

**Universidade Nova de Lisboa**  
Faculdade de Ciências e Tecnologia  
Departamento de Engenharia Civil

# **Apreciação de riscos em barragens de aterro**

Eduardo Leitão dos Santos Nunes

Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências  
Tecnológicas da Universidade Nova de Lisboa para  
Obtenção do grau Mestre em Engenharia Civil –  
- Perfil de Reabilitação de Edifícios.

Orientador: Professor Mário J. Franca

2011



## **Agradecimentos**

O primeiro agradecimento dirige-se ao meu orientador de dissertação, o professor Mário J. Franca, pela disponibilidade, esclarecimentos, disponibilização de materiais, debate de ideias e auxílio prestado sempre que necessário na elaboração desta dissertação.

Outro agradecimento dirigido à engenheira Ana Quintela pelo auxílio prestado tanto pelo empréstimo de material de estudo como pela verificação e divulgação de algumas componentes do trabalho, sem as quais poderiam desembocar em resultados falaciosos.

Um agradecimento à minha família pela paciência e incentivo prestados na conclusão desta etapa académica e, sobretudo, da minha vida.

Uma palavra de apreço aos meus amigos em geral pelos conselhos e incentivos a título pessoal prestados ao longo dos tempos.

Um agradecimento aos meus colegas de curso Bruno, Diogo, Filipe, Gisela, Joana F., Joana P., Marta, Tiago, Rui e demais pela partilha de informação e boa disposição que foi uma constante ao longo da minha formação académica superior.

O maior agradecimento para a Andreia pelo incentivo, coragem e amor revelados ao longo dos tempos. Foram estes os pilares mais fortes da vontade com que foi finalizada mais uma etapa de vida.



## **Resumo**

A apreciação de risco é inerente ao ser humano uma vez que este rodeia todas as acções executadas pelo homem. Partindo do pressuposto que qualquer actividade tem um risco associado, compete ao homem a decisão de assunção de um risco em função de se poder usufruir das suas mais-valias. É à luz deste mecanismo que surge o sistema de gestão de riscos.

A gestão de riscos é um sistema onde se percorrem todas as etapas de avaliação de risco buscando um resultado final que se traduza numa validação ou negação do risco. A apreciação de risco é uma das etapas desse sistema que surge como forma de ligação entre uma área de dimensão humana, uma área de dimensão económica e uma área de dimensão legislativa, promovendo o debate de todos os sectores que trabalham no projecto e que dele irão usufruir. É através da apreciação de risco que se analisa a decisão de viabilidade de um projecto.

A aplicação da apreciação de risco ao estudo de grandes barragens reveste-se de grande importância devido ao papel fulcral na decisão da sua construção tendo em conta o risco que lhe é inerente, apoiando-se em discussões junto de poderes decisórios e da população. A apreciação de risco pode inclusive permitir alterações de regulamentação de um país.

Percorrendo um sistema que se afirma como válido perante a comunidade de engenharia, procura-se assim analisar e avaliar os riscos associados a uma barragem em aterro existente que permitem a avaliação destes face aos benefícios que a obra possa oferecer. A validação, no enquadramento da apreciação de riscos, baseia-se em debates entre grupos de estudo, documentação e legislação existente à data.

Procede-se na presente dissertação à apreciação quantitativa de risco aplicada a uma barragem de aterro, por análise da relação entre as consequências expectáveis no vale a jusante e a probabilidade associada, e à análise semi-quantitativa do risco associado ao vale a jusante que se desenvolverá mediante a aplicação dos resultados obtidos a uma matriz de risco proposta.

Palavras-chave: Risco, Gestão de risco, Apreciação de risco, Gráfico bi-logaritmico, Matriz de risco.



## **Abstract**

Nowdays, the interaction between areas of knowledge is more legible by instruments applied on a long range of areas of study. The same instrument that is applied to a specific area can be applied to a different one and lead to same output application. One example of that statement is the use of Risk Management. This theme is used as a global overview of the processes that risk can lead to.

The complexity of Risk Management leads us to study one area of interest, the risk appreciation. This theme as particular interest when applied to study of embankment dams, especially those that are considered large dams. The perception of risk related to a dam is to be taken by each person but to be considered as a societal risk. The propose of risk appreciation it to generate a symbioses between the analysis of the project and the way that the information is processed to society.

To measure risk appreciation, it has been used two ways of analysis: a quantitative, expressed by bi-logarithmic graphs, and a qualitative analysis expressed by risk matrixes. These forms of analysis will bring up a good range of information related to the matter in debate.

**Keywords:** Risk, Risk management, risk appreciation, bi-logarithmic graphs, risk matrix.





## **Lista de Acrónimos**

ALARP – As Low as Reasonable Possible

ANPC – Autoridade Nacional de Protecção Civil

CGA – Comissão de Gestão de Albufeiras

CNPGB – Comissão Nacional Portuguesa das Grandes Barragens

CSB – Comissão de Segurança de Barragens

ETA – Estação de Tratamento de Águas

INAG – Instituto da Água

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

NEV – Número Expectável de Vidas

NA – Nível de Alerta

NmE – Nível Mínimo de Exploração

NMC – Nível Máximo de Cheia

PAR – Pessoas na Área de Risco

PEB – Plano de Emergência da Barragem

PEE – Plano de Emergência Externo

PEI – Plano de Emergência Interno

RSB – Regulamento de Segurança de Barragens

ZAS – Zona de Auto Salvamento



## Índice

1. Introdução .....	1
1.1 Enquadramento .....	1
1.1.1 Consideração Geral.....	1
1.1.2. Breve contexto histórico.....	2
1.1.3. Grandes barragens em números .....	3
1.1.4. Barragem e acidentes .....	4
1.2 Âmbito .....	6
1.3 Objectivo da dissertação .....	7
1.4 Metodologia da dissertação .....	7
1.5 Estrutura da dissertação .....	7
2. Avaliação de riscos relativamente a barragens de aterro .....	9
2.1. Sumário sobre barragens.....	9
2.2. Barragens rígidas .....	10
2.3. Barragens de aterro ou não rígidas .....	11
2.3.1. Introdução .....	11
2.3.2. Perfis-tipo em barragens de aterro .....	12
2.3.3. Materiais utilizados em barragens de aterro .....	16
2.3.4. Tipos de falhas mais comuns em barragens de aterros .....	17
2.4. Contextualização de avaliação de riscos em estudo de grandes barragens.....	18
2.4.1. Gestão de riscos.....	18
2.4.3. Controlo de riscos.....	22
2.5. Avaliação de Riscos .....	25
2.5.1. Introdução .....	25
2.5.2. Risco individual .....	27
2.5.3. Risco societal .....	28
2.5.4. Análise quantitativa de avaliação de riscos .....	29
2.5.5. Análise qualitativa ou semi-quantitativa de avaliação de riscos. ....	30
2.5.6. Barragens e legislação .....	32
2.5.7. Plano de Emergência de uma Barragem .....	35
3. Análise de risco na Barragem de Odelouca .....	41
3.1. Considerações gerais .....	41

3.1.1. Breve caracterização da barragem em estudo.....	41
3.1.2. Historial.....	42
3.1.3. Principais características da barragem de Odelouca.....	43
3.2. Aplicação de apreciação de risco à barragem de Odelouca.....	49
3.2.1. Análise quantitativa.....	49
3.2.2. Análise qualitativa ou semi-quantitativa de apreciação de riscos .....	57
3.3. Discussão de resultados .....	63
3.3.1. Introdução .....	63
3.3.2. Análise quantitativa.....	63
3.3.3. Análise qualitativa .....	68
4. Conclusão.....	75
4.1. Conclusões gerais .....	75
4.2. Propostas para futuros trabalhos.....	77
Bibliografia.....	79
Anexos .....	81
Anexo I.....	83
Quadro global de análise quantitativa .....	83
Anexo II.....	85
Quadro particular de análise quantitativa.....	85
Anexo III.....	89
Gráficos bi-logaritmicos para análise quantitativa.....	89
Anexo IV.....	101
Quadro relativo à análise qualitativa .....	101

## Índice de Quadros

Quadro 1 - Exemplos de acidentes em barragens(fonte: Wikipedia) .....	5
Quadro 2 - Classificação de barragens de acordo com danos potenciais (de acordo com o RSB). .....	34
Quadro 3 - Volumes de água das albufeiras e aquíferos da região onde a barragem de Odelouca se insere. ( <a href="http://aguasdoalgarve.pt/odelouca/index.php/caractart/disponibilidadesnecessidades">http://aguasdoalgarve.pt/odelouca/index.php/caractart/disponibilidadesnecessidades</a> ) .....	42
Quadro 4 - Características gerais da barragem de Odelouca ( <a href="http://aguasdoalgarve.pt/odelouca/index.php/caractart/barragem">http://aguasdoalgarve.pt/odelouca/index.php/caractart/barragem</a> ).....	44
Quadro 5 - Características gerais do túnel Odelouca-Funcho .....	47
Quadro 6 - Tipos de ocorrência e actividades analisadas. ....	50
Quadro 7 - Classificação de probabilidade de originar ruptura quanto ao tipo de probabilidade, valor atribuído a este e nível de alerta onde se insere.....	55
Quadro 8 - Significado das classes de probabilidades (Baptista, 2009). ....	57
Quadro 9 - Significado das classes de consequências (Baptista, 2009).....	58
Quadro 10 - Classes de risco e medidas associadas (adaptado de Baptista, 2009).....	61
Quadro 11 - Enquadramento de actividades em termos de vidas conforme classe de risco.....	70
Quadro 12 - Enquadramento de actividades económicas conforme classe de risco.....	72
Quadro 13 - Enquadramento de actividades ambientais conforme classe de risco. ....	74
Quadro 14 - Dados relativos a factores económicos .....	87

## Índice de Figuras

Figura nº 1 - Exemplos de barragens rígidas: a) Contrafortes resistentes, b) Arco, c) Gravidade	10
Figura nº 2 - Exemplos de barragens de aterro: a) Terra, b) Enrocamento, c) Gabiões .....	11
Figura nº 3 - Exemplo de perfil-tipo de uma barragem de terra homogénea (Lança, 1997). ....	13
Figura nº 4 - Exemplo de perfil-tipo com terra homogénea e dreno no pé de jusante (Lança, 1997).....	13
Figura nº 5 - Exemplo de perfil-tipo com terra homogénea e tapete drenante (Lança, 1997). ....	14
Figura nº 6 - Exemplo de perfil tipo de terra homogénea e sistema de drenos horizontal (tapete drenante) e vertical (chaminé drenante) (Lança, 1997). ....	14
Figura nº 7 - Exemplo de barragem com núcleo central (Lança, 1997). ....	15
Figura nº 8 - Esquemática básica de funcionamento de gestão de risco (baseado em Baptista, 2009).....	20
Figura nº 9 - Esquemática geral do procedimento de gestão de risco (Baptista 2009).....	24
Figura nº 10 - Explicação de limites de aceitabilidade e tolerabilidade. ....	28
Figura nº 11 - - Exemplo de matriz de riscos. ....	31
Figura nº 12 - Abastecimento público de água na região onde a barragem de Odelouca se insere. ....	41
Figura nº 13 - Aspecto geral do descarregador de cheias ainda em fase de construção).....	45
Figura nº 14 - Aspecto geral do descarregador de cheia visto do corpo de barragem.....	45
Figura nº 15 - Vista geral do descarregador de cheias da barragem de Odelouca. ....	46
Figura nº 16 - Edifício de monitorização da descarga de fundo (visto do corpo de barragem)...	46
Figura nº 17 - Aspecto geral da descarga de fundo (ainda em construção).....	47
Figura nº 18 - – Aspecto geral do edifício de monitorização do túnel Odelouca-Funcho enquadrado na albufeira da barragem de Odelouca.....	48
Figura nº 19- Exemplo de aplicação de gráfico bi-logaritmico enquadrado no estudo de perdas de vida numa situação de Falha estrutural - Percolação através dos encontros e Instabilidade do corpo de barragem. ....	56
Figura nº 20 - Representação da matriz de risco proposta para realização do trabalho de apreciação de risco (adaptado de Baptista, 2009).....	62
Figura nº 21 - Gráfico padrão utilizado como instrumento de avaliação contendo os limites em estudo.....	64
Figura nº 22 - Gráfico bi-logaritmico de relação entre a actividade Falhas de órgãos de descarga e o número de perdas de vida. ....	65
Figura nº 23 - Gráfico bi-logaritmico de relação Ruptura de açude de S. Marcos e o número de perdas de vida. ....	66
Figura nº 24 - Gráfico bi-logaritmico de relação Deslizamento de encostas e o número de perdas de vida. ....	66

Figura nº 25 - Gráfico bi-logaritmico de relação entre a actividade Sismos e o número de perdas de vida. ....	67
Figura nº 26 - Representação da matriz de risco com probabilidade média relativamente a perdas de vidas. ....	69
Figura nº 27 - Representação da matriz de risco com probabilidade média relativamente a perdas económicas. ....	71
Figura nº 28 - Representação da matriz de risco com probabilidade média relativamente a perdas ambientais. ....	73
Figura nº 29 - Gráfico bi-logaritmico de relação entre a actividade Cheias e o número de perdas de vida. ....	91
Figura nº 30 - Gráfico bi-logaritmico de relação entre a actividade Sismos e o número de perdas de vida. ....	91
Figura nº 31 - Gráfico bi-logaritmico de relação entre a actividade Falhas de órgãos de descarga e o número de perdas de vida. ....	92
Figura nº 32 - Gráfico bi-logaritmico de relação entre o tipo Falha estrutural com as actividades de Erosão interna, Transferência de tensões /Fracturação hidráulica, Colapso, subsidiência ou fissuração localizada e o número de perdas de vida. ....	92
Figura nº 33 - Gráfico bi-logaritmico de relação entre o tipo Falha estrutural com as actividades de Percolação através dos encontros e Instabilidade do corpo de barragem e o número de perdas de vida. ....	93
Figura nº 34 - Gráfico bi-logaritmico de relação Ruptura de açude de S. Marcos e o número de perdas de vida. ....	93
Figura nº 35 - Gráfico bi-logaritmico de relação Deslizamento de encostas e o número de perdas de vida. ....	94
Figura nº 36 - Gráfico bi-logaritmico de relação Acção criminosa e o número de perdas de vida. ....	94
Figura nº 37 - Gráfico bi-logaritmico de relação Cheias e o número de perdas de economia equivalente. ....	95
Figura nº 38 - Gráfico bi-logaritmico de relação Sismos e o número de perdas de economia equivalente. ....	95
Figura nº 39 - Gráfico bi-logaritmico de relação Falha nos órgãos de segurança e o número de perdas de economia equivalente. ....	96
Figura nº 40 - Gráfico bi-logaritmico de relação entre o tipo Falha estrutural com as actividades de Erosão interna, Transferência de tensões /Fracturação hidráulica, Colapso, subsidiência ou fissuração localizada e o número de perdas de economia equivalente. ....	96
Figura nº 41 - Gráfico bi-logaritmico de relação entre o tipo Falha estrutural com as actividades de Percolação através dos encontros e Instabilidade do corpo de barragem e o número de perdas de economia equivalente. ....	97
Figura nº 42 - Gráfico bi-logaritmico de relação Falha de energia e o número de perdas de economia equivalente. ....	97
Figura nº 43 - Gráfico bi-logaritmico de relação Ruptura de açude de S. Marcos e o número de perdas de economia equivalente. ....	98
Figura nº 44 - Gráfico bi-logaritmico de relação Deslizamento de terras e o número de perdas de economia equivalente. ....	98
Figura nº 45 - Gráfico bi-logaritmico de relação Acções criminosas e o número de perdas de economia equivalente. ....	99





# **1. Introdução**

## **1.1 Enquadramento**

### **1.1.1 Consideração Geral**

As barragens tornaram-se elementos de grande preponderância para as sociedades devido à importância que estas apresentam na vivência do homem. Vistas como elementos cruciais ao progresso, obtiveram a sua evolução natural ao longo da história acompanhando o homem até aos dias de hoje. As barragens surgem pela necessidade de armazenamento de água que permitiu a fixação de população, permitindo assim fazer face a períodos de seca.

Uma barragem caracteriza-se por ser uma barreira artificial implantada num leito de água que tem como função principal a retenção de água numa albufeira a montante do seu corpo de forma a servir variados fins. Entre estes destacam-se:

- Abastecimento de água para consumo público
- Regadio
- Produção de electricidade
- Retenção de inertes (no fundo da albufeira)
- Utilização com finalidade de turismo e lazer
- Controlo de caudal de linha de água onde se insere.

Apesar do seu carácter de utilidade existe, por norma, um sentimento de desconfiança em relação a estas devido ao elevado potencial de perda que acarretam. Existem testemunhos históricos de acidentes relacionados com falhas de barragens, geralmente no seu vale a jusante, que causaram inúmeras perdas de vida e incalculáveis perdas económicas. Devido a este factor de insegurança, a engenharia encarregou-se de minimizar o mais possível estas perdas mediante uma maior focalização no estudo de planos mais pormenorizados, manutenção mais eficiente deste tipo de estruturas, preocupação de existência de trabalho junto das populações potencialmente afectadas mediante exercícios de informação e simulação, e demais factores preponderantes para que as barragens sejam cada vez mais seguras, nomeadamente com responsabilização sobre a sua construção e manutenção que diz respeito directamente a empresas e pessoas.

Com a necessidade de um maior controlo foram formados vários órgãos que estudam a nível global esta temática, foram desenvolvidas legislações a nível dos países, passaram a existir grupos de reflexão sobre a temática que contribuem com as suas ideias, mais e melhor formação para os trabalhadores envolvidos neste tipo de projectos e planos mais aproximados do idealizado para o seu bom funcionamento. Em suma, passou a existir uma melhor compreensão do assunto devido aos esforços realizados de todos os envolvidos.

É neste contexto que surge a apreciação de riscos sobre barragens. A apreciação de riscos pretende identificar os principais problemas que podem afectar uma barragem em estudo e procura transmitir uma resposta através de informação da forma mais adequada a proceder para minimizar os impactos que daí advêm. Esta resposta é elaborada mediante estudos de cariz social, vivência de pessoas com um elemento desta natureza, transmissão de resultados de estudo aos mais variados grupos intervenientes no projecto de barragem, quais as condicionantes que podem afectar a barragem e consequente estudo das mesmas, sendo que este estudo é transmitido através de um relatório a ser considerado pelos responsáveis pela barragem.

Existe ainda uma correlação entre o número de barragens/dimensões destas com o grau de desenvolvimento de um país sendo que, por norma, quanto mais barragens e de maiores dimensões estas são, maior é o grau de desenvolvimento económico do país. A título de curiosidade, o país que possui maior número de grandes barragens registadas pela *International Commission on Large Dams* (ICOLD) é os Estados Unidos da América se bem que estima-se que o país com mais grandes barragens será a China. Este desconhecimento deve-se ao facto de a China ser um membro recente da ICOLD.

### **1.1.2. Breve contexto histórico**

As barragens sempre tiveram uma grande expressão na sua utilização devido ao reconhecimento de utilidade que este tipo de estrutura proporciona. Com a evolução dos materiais aplicados, assim como variação de geometria conforme especificidades do terreno, a evolução de barragens foi um bom paradigma da evolução tecnológica ao longo da sua história.

Existem registos de que na actual região da Jordânia existe uma barragem de aterro com revestimento em alvenaria sendo que esta está datada de 3000 a.C. em que a sua principal finalidade era de abastecimento de água à cidade de Jawa. Esta é tida como a barragem mais antiga ainda em funcionamento (Garcia, 2011).

Ao longo do tempo, as várias correntes civilizacionais tenderam a desenvolver e melhorar as barragens, introduzindo outro tipo de materiais na sua construção, assim como experimentar outros tipos de geometrias para que se conseguisse conter mais água nas suas albufeiras visto que os grandes pólos urbanos careciam de maior necessidade de armazenamento de recursos. Um dos casos com maior presença de construção de barragens foi o Império Romano que foi fértil em construção de obras de arte assim como de utilização de outro tipo de materiais para além dos comuns utilizados à data.

Outra época histórica a ter em conta é a Revolução Industrial, esta com uma dimensão mundial, em que houve um *boom* de novas ideias e melhoramentos significativos na tecnologia existente sendo que a construção, e em especial as barragens, não foi excepção. Nesta época existiu um aumento massivo de número de barragens, iniciando-se a construção de barragens em betão.

Com a descoberta da electricidade e posteriores estudos de forma a mantê-la estável para aproveitamento do seu potencial, surge então o conceito de produção de energia aproveitando os recursos hídricos, produção laborada através das hoje conhecidas barragens hidroeléctricas. Devido aos seus bons resultados surge a sua massificação e

formas de produção da mesma. Nos dias que correm, a electricidade é a forma primordial de energia utilizada para consumo humano. Uma parte dessa energia é proveniente das centrais hidroeléctricas intensificando mais a importância que se atribui às barragens na vivência humana. A título de curiosidade, a primeira barragem hidroeléctrica foi construída na região das Cataratas do Niagara no ano de 1886.

Na escala nacional, sabe-se que existiram bastantes barragens que datam da época romana e consequentes épocas contudo, segundo a documentação em vigor, as barragens mais antigas que ainda se encontram no activo, a nível nacional, são duas barragens de alvenaria que começaram a laborar no ano de 1913, sendo que estas são a barragem da Tapada Pequena (Rio Guadiana na região de Beja) e a barragem da Tapada (Rio Sado na região de Setúbal). Pode afirmar-se que o projecto de barragem mais mediático produzido em Portugal é o da barragem de Cahora-Bassa (1974), localizada em Moçambique, sendo que esta barragem foi, na altura, a terceira maior barragem de África.

### **1.1.3. Grandes barragens em números**

Por forma a contextualizar um pouco a importância das barragens importa observar os números que lhes são atribuídos.

Em termos do fim para que são construídas, as grandes barragens dividem-se em barragens com fim único tendo sido contabilizadas 26996 barragens que representam 71,7% do parque existente de grandes barragens enquanto as barragens de fins múltiplos foram contabilizadas em 9300 que representam 24,7% do parque de grandes barragens existentes (ICOLD, 2011).

Tendo em linha de conta o carácter de fim múltiplo que as barragens proporcionam nos dias que correm, estima-se que das actividades associadas a barragens que não apenas o objectivo de retenção de águas, 48% das barragens servem o propósito de irrigação de terras, 17% são utilizadas para produção de energia, 13% para abastecimento de águas, 10% para controlo de cheias, 5% com fins recreativos e cerca de 1% serve o propósito de navegação interior e aquacultura. Os restantes 6% servem propósitos variados não mencionados (ICOLD, 2011).

Quanto ao tipo de grandes barragens com fins múltiplos existentes e registadas em todo o mundo, cerca de 63% das barragens são barragens de terra, 17% são barragens de gravidade, 8% são barragens de enrocamento, 5% são barragens de arco, sendo que os restantes 7% se atribuem a outros tipos de barragens (ICOLD, 2011).

Toda a informação aqui observada foi adaptada da constante do domínio da Internet da ICOLD ([http://www.icold-cigb.net/GB/Dams/role\\_of\\_dams.asp](http://www.icold-cigb.net/GB/Dams/role_of_dams.asp)) e ANCOLD (<http://www.ancold.org.au/images/files/glossary.pdf>), no presente ano de 2011.

#### 1.1.4. Barragem e acidentes

Devido à ocupação de solo que se vem verificando, os vales a jusante das barragens vêm sendo cada vez mais ocupados com variados tipos de utilização, factor que agravará directamente o risco que existe aquando da construção de uma barragem.

Existem várias formas pelas quais uma barragem pode falhar podendo provocar um acidente. Estes acidentes podem ter origem nos mais variados factores tanto de ordem natural como de erro humano.

Em relação aos acidentes por ordem natural salienta-se que são objecto de estudo, devido ao carácter de ameaça à estabilidade da barragem, as cheias, os sismos e todos os fenómenos que actuam directamente na barragem fora do controlo directo do homem, por exemplo um deslizamento de terras significativo para a albufeira que resulta num enchimento rápido da mesma e provoca o seu galgamento ou por exemplo o fenómeno de erosão interna (ou também conhecido como *piping*).

Os erros de cálculo e uma manutenção deficiente da barragem são algumas das principais fontes de ocorrência de acidentes devido a erro humano. Devido a este facto, a gestão de riscos ganha preponderância na análise e tentativa de resolução deste tipo de problemas, mediante a sua aplicação.

Apesar de a larga maioria da problemática de um acidente numa barragem se concentrar no vale a jusante da mesma, tem de se ter presente que podem ocorrer problemas a montante desta que, em caso último, podem influenciar directamente o comportamento do corpo de barragem originando acidentes.

No Quadro 1 constam alguns exemplos de acidentes que aconteceram com barragens, temática esta que será desenvolvida no trabalho de forma mais aprofundada.

**Quadro 1 - Exemplos de acidentes em barragens (fonte: [www.wikipedia.pt](http://www.wikipedia.pt), [http://matdl.org/failurecases/Dam\\_Failures/Teton](http://matdl.org/failurecases/Dam_Failures/Teton), [http://simscience.org/cracks/advanced/malpasset\\_problem.html](http://simscience.org/cracks/advanced/malpasset_problem.html) )**

ANO	TIPO DE ACIDENTE	NOME DA BARRAGEM	LOCALIZAÇÃO	PERDAS HUMANAS
1963	Deslize de terras a montante	Vajont	Itália	2.500
1975	Cheias	Banqiao	China	171.000
2003	Erosão interna	Hope Mills	E.U.A	0 (perdas avultadas a nível económico)
2009	Erro humano	Sayano–Shushenskaya	Rússia	411 desaparecidos
1959	Variados factores	Malpasset	França	500
1976	Primeiro enchimento	Teton	Estados Unidos da América	14

## 1.2 Âmbito

A utilização de barragens veio alterar drasticamente tanto o ambiente onde estas se inserem como o quotidiano das várias civilizações. Factor preponderante para existir um certo receio na sua utilização é o historial que as barragens acarretam de acidentes com perdas económicas e mesmo humanas, normalmente no vale a jusante das mesmas, sendo que ainda na segunda metade do século XX existiram acidentes que provocaram milhares de vítimas humanas e incalculáveis perdas económicas e ambientais. Neste âmbito, surgiu a necessidade de estudar esta temática e melhorar a segurança das barragens, tendo sido formado para o efeito um fórum internacional de debate denominado como *International Commission on Large Dams* (ICOLD), órgão que tem como função o debate de ideias e disseminação das mesmas pelos países membros. As ideias debatidas nestes fóruns não são mais do que estudos feitos por especialistas na área, sua posterior divulgação perante a comunidade, debate e aceitação dos mesmos aos olhos dos elementos do ICOLD.

Portugal faz parte deste grupo sob a designação de Comissão Nacional Portuguesa das Grandes Barragens (CNPGB), grupo este que directamente relacionado com o Ministério do Ambiente Português logo tutelado pelo Estado Português, tendo como função a difusão de informação dos fóruns e a elaboração de estudos que contribuam de uma forma positiva para o desenvolvimento da temática.

A construção de barragens deve ser entendida de uma forma dinâmica, ou seja, a construção de uma barragem não se finda na sua construção mas termina aquando da sua desactivação. Devido a este facto, torna-se então necessário projectar uma barragem para um período de tempo realista e que sobretudo sirva os propósitos a que foi sujeita com o máximo de segurança possível e o mínimo de impactos ambientais. Para que exista então um acompanhamento eficiente do empreendimento, torna-se necessária a reunião de todos os aspectos directamente relacionados com a barragem em si que se irá exprimir na designada gestão de risco.

A gestão de risco surge para dar resposta à solicitação de uma análise mais aprofundada do empreendimento que é uma barragem. Genericamente, pauta-se pela reunião de toda a informação de projecto, sua análise e processamento, verificação de conformidade com a legislação vigente e com os propósitos da obra, debate com os mais variados grupos tanto de especialistas assim como da população afectada pela barragem, o acompanhamento da construção da barragem, a monitorização desta ao longo do seu tempo de vida e, num propósito último, a decisão da sua desactivação ou de uma reestruturação prolongando assim o tempo de vida útil da barragem. Pode-se assumir a gestão de risco como uma supervisão global de todas as áreas intervenientes directamente na barragem.

A apreciação de risco é a faceta mais social da gestão de risco. O seu propósito é o acompanhamento e debate de ideias junto dos mais variados grupos relacionados directamente com o projecto da barragem. Pode ser praticada numa fase anterior à construção ou, caso já exista, a barragem será sujeita a avaliações temporárias por um grupo de especialistas com a finalidade de aferir o estado da obra e quais as preocupações mais latentes aquando dos trabalhos de análise.

### **1.3 Objectivo da dissertação**

O objectivo deste trabalho é a elaboração de um exemplo de aplicação de apreciação de risco sobre a Zona de Auto Salvamento (ZAS) de uma barragem de aterro em território português, sendo que a barragem em estudo é a barragem de Odelouca (Monchique, Algarve).

### **1.4 Metodologia da dissertação**

Este trabalho desenvolve-se sobretudo mediante a análise de um Plano de Emergência Interno elaborado sobre a barragem de Odelouca e, de acordo com a temática em causa, de documentação que fornece informação útil sobre probabilidades de ocorrência de variados tipos de acidentes em barragens, assim como análise de alguns trabalhos desenvolvidos sobre apreciação de risco aplicados a barragens.

### **1.5 Estrutura da dissertação**

A presente dissertação organiza-se mediante quatro capítulos, sendo que cada um destes tratará de um assunto em específico.

O primeiro capítulo é a introdução que compreende um enquadramento das barragens num contexto do quotidiano incluindo um enquadramento histórico das mesmas, um âmbito de trabalho que faz a primeira ligação entre objecto de estudo (barragem) com a metodologia aplicada ao longo deste trabalho (apreciação de risco), uma metodologia que compreende a forma como o trabalho foi desenvolvido e uma estrutura onde se explica o conteúdo de cada um dos capítulos da presente dissertação.

O segundo capítulo corresponde a uma explicação mais concreta da metodologia da apreciação de riscos aplicada a barragens, sendo que existe um aprofundamento dos conceitos de barragem e de apreciação de risco e se explica a ligação destes dois conceitos.

O terceiro capítulo é reservado ao caso de estudo de apreciação de riscos, onde se pretende aplicar os conceitos descritos no capítulo anterior à barragem de Odelouca.

O quarto e último capítulo tem como função a reflexão final sobre os resultados obtidos e a sugestão para futuros trabalhos a desenvolver.





## **2. Apreciação de riscos relativamente a barragens de aterro**

### **2.1. Sumário sobre barragens**

As barragens foram evoluindo ao longo dos tempos conforme se foram experimentando novos tipos de materiais e geometrias, tornando-se assim o objecto “barragem” num alvo de elemento de estudo mais aprofundado. Foram estas evoluções que permitiram uma retenção cada vez maior de água nas albufeiras sendo que, nos dias que correm, a construção de barragens procura realizar-se de acordo com as necessidades não apenas a nível local mas a nível regional e por vezes a nível inter-regional, permitindo então uma servidão destas mais vasta do que as barragens de outrora experimentavam.

O local onde se irá inserir a barragem é de extrema importância uma vez que o custo associado a um projecto de barragem é muito dispendioso e tem de se procurar o local onde a sua implantação é mais viável quer a nível económico quer a nível de desempenho do seu propósito. É nesta fase que o trabalho de várias disciplinas como a hidráulica, topografia, geologia, geografia, etc., se torna um contributo precioso na ponderação da decisão do local de implantação da barragem sendo que cada uma destas áreas empresta o seu contributo e experiência para uma ponderação mais eficaz. Para além destes factores, o objectivo principal de uma barragem é a retenção de água logo deve-se buscar o local onde melhor se possa exprimir o trinómio volume de água retido - utilização de materiais de desmonte – potencialidade económica. Se não existirem outros tipos de interesses para a implantação da mesma que obrigue a uma mudança do local de implantação da barragem (ex. descoberta de património arqueológico significativo como foi o caso da construção da barragem de Foz Côa), esta deverá ser a chave da busca deste domínio.

Devido à sua utilização ao longo do trabalho, importa definir alguns conceitos relativos a barragens que serão abordados.

- O Nível Mínimo de Exploração (NmE) corresponde ao nível mínimo de albufeira que permite a exploração de uma barragem. No caso de barragens de aterro, este nível permite também no caso de o NmE possuir uma altura significativa acima da base e se o seu paramento a montante for protegido com uma solução de enrocamento, a dispensa de protecção de enrocamento abaixo do NmE sem comprometer o propósito da mecânica de percolação da barragem, tendo que ser construída uma pequena banquetta que sirva de base à aplicação do enrocamento.
- O Nível Máximo de Cheia (NMC) é o nível que, em nenhuma circunstância, pode ser excedido comprometendo seriamente o propósito de retenção de águas e podendo originar acidentes que comprometam a estrutura de barragem.
- O Nível de Pleno Armazenamento (NPA) é “a cota máxima a que pode realizar-se o armazenamento de água na albufeira, definida em sede do projecto da respectiva barragem” (artigo 3º do Decreto-Lei nº 107/2009 de 15-05-2009).

Existem dois grandes grupos de barragens, cada um com as suas especificidades e propósito. As barragens rígidas e as barragens de aterro (ou barragens não rígidas).

## 2.2. Barragens rígidas

As barragens rígidas são estruturas hidráulicas constituídas por betão ou alvenaria de pedra aparelhada. São construídas em vales estreitos e com boas condições de fundação, ou seja, com existência de rocha compacta na sua fundação. Não são barragens com grande extensão (comparativamente com as barragens não rígidas) sendo que o custo por metro quadrado é substancialmente mais dispendioso quando comparadas com barragens de aterro devido aos materiais utilizados (nomeadamente betão) e pelo facto de os tipos de materiais utilizados serem, na sua maioria, de proveniência exterior ao contexto de inserção da barragem. Não obstante esse facto, acaba por se pontuar como uma solução válida devido ao seu carácter de resistência à maioria dos acidentes que ocorrem genericamente em barragens. A construção de uma barragem de betão requer uma atenção redobrada na sua elaboração uma vez que um erro humano a nível de cálculo pode ser crucial na sua estabilidade podendo originar, em caso último, uma ruptura total da barragem e consequentes perdas. A maioria das barragens hidroeléctricas é projectada a partir deste tipo de solução, sendo então consideradas barragens rígidas.

As barragens rígidas surgem de acordo com três tipos principais de construção: barragem de abóbada, barragem de gravidade e barragem de contrafortes resistentes.

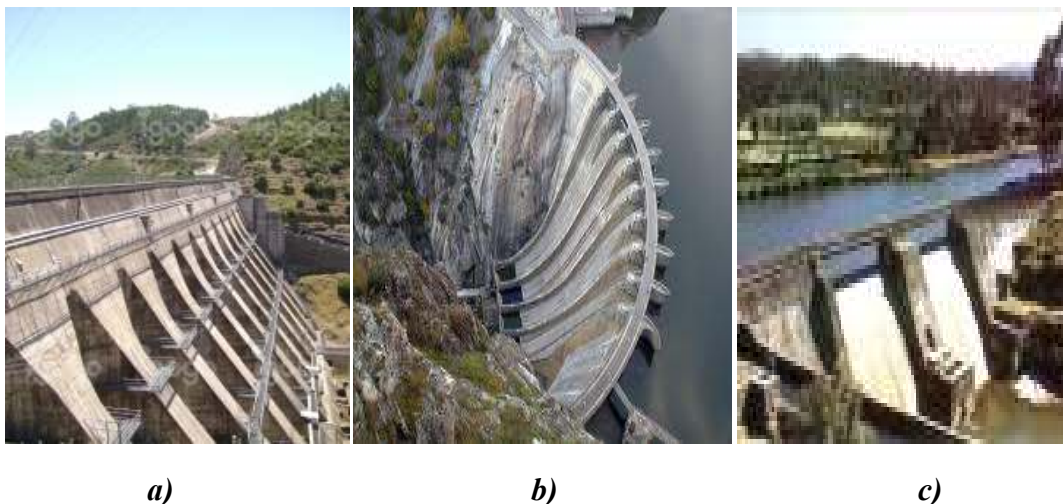


Figura nº 1 - Exemplos de barragens rígidas: a) Contrafortes resistentes (<http://www.igogo.pt/barragem-da-pracana/>), b) Arco (<http://www.engenhariacivil.com/elementos-finitos-dimensionamento-barragens>), c) Gravidade (<http://estilosdevida.rtp.pt/rtp/barragem-de-andorinhas-locais-a-visitar-povoa-de-lanhoso-taide-taide-1.html&tab=fotos>)

O material mais utilizado em barragens rígidas é o betão. Devido às suas propriedades sobejamente conhecidas de conservação, durabilidade, maleabilidade, etc., torna-se uma boa escolha quando se pretendem conservar as características acima descritas ou se se requer uma construção de barragem com alguma finalidade que não apenas a retenção de água (ex. barragem hidroeléctrica). Apesar destas características, o preço do betão face a outras soluções pode pesar bastante na decisão final de implantação da barragem, assim como todos os trabalhos adjacentes à sua construção (ex. trabalhos sobre a rocha de fundação são mais dispendiosos do que trabalho sobre uma fundação de barragem de aterro).

## 2.3. Barragens de aterro ou não rígidas

### 2.3.1. Introdução

As barragens de aterro são constituídas por materiais desagregados entre si nos seus paramentos e material de cariz mais rígido no seu interior (ou núcleo). Este tipo de barragens permite cobrir uma extensão longa dum curso de água onde se encontrem implantadas e não requer material compacto na sua fundação para o que o seu funcionamento seja o adequado. Como principais características, as barragens de aterro possuem uma grande capacidade de resistência a grandes deformações sem entrar em ruptura. É um tipo de solução, em média, com menos peso por metro quadrado de solução do que a solução de barragens rígidas (este factor deve-se ao peso específico do betão ser na ordem dos  $2,4 \text{ g/cm}^3$  e os tipos de solos utilizados nestas soluções serem francamente mais leves), possuem base larga para distribuir o seu peso, as soluções de taludes utilizadas são mais suaves na sua relação H:V do que o tipo de soluções de betão (contudo deve-se garantir que o material se encontre bem compactado e bem dimensionado para não existirem deslizamentos de material) permitindo assim um eficiente processo de percolação do atravessamento da água pelo corpo de barragem. Em termos de planeamento, é uma alternativa que permite uma poupança no material usado, sendo que muito deste é, por norma, material originário da zona de implantação. Em termos de economia, é um tipo de solução com boa aceitação daí ser um tipo de solução popular aquando se trata de decidir a construção deste tipo de estrutura com objectivo principal de retenção de água.

Existem três tipos principais de métodos construtivos de barragens de aterro: barragens de terra, barragens de enrocamento e barragens em gabiões.



a)

b)

c)

Figura n° 2 - Exemplos de barragens de aterro: a) Terra (<http://www.alvarocamargo.com.br/albuns/projetos/Usina%20Hidreletrica%20de%20Tucuru%20slides/Barragem%20de%20terra%20.html>), b) Enrocamento ([http://www.terracell.com.pt/produtos\\_detalhe.php?idProduto=5](http://www.terracell.com.pt/produtos_detalhe.php?idProduto=5)), c) Gabiões (<http://proeest.com/page9.php?view=preview&category=4&image=3>)

Pode-se ainda considerar uma sub-decomposição dos tipos de barragens de aterros sendo que as barragens de terra se podem classificar com perfil homogéneo ou com perfil zonado, as barragens de enrocamento com órgão de estanquidade a montante ou com órgão de estanquidade interno e as barragens mistas que são projectadas com os dois tipos de perfil, de enrocamento e de terra.

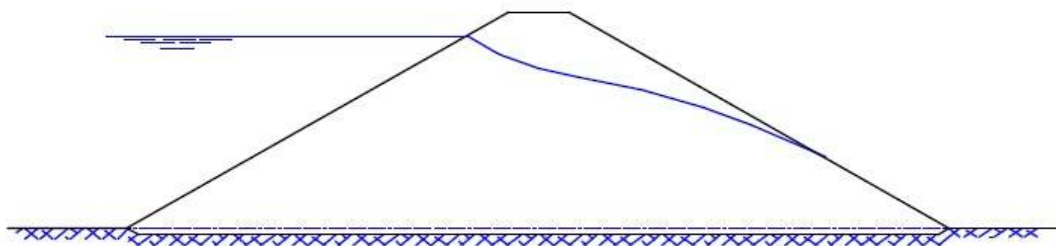
Ainda existem mais alguns tipos de barragens de terra como é o caso de barragem de terra com um maciço de betão (convencional ou compactado) ou maciço de outros materiais com boas propriedades de estanquicidade como é o caso da argila (Caldeira *in* INAG, 2001).

### **2.3.2. Perfis-tipo em barragens de aterro**

Os perfis-tipo de barragens vêm evoluindo ao longo da história da construção de barragens conforme se foram estudando e ensaiando soluções que servissem o propósito ao qual a barragem era destinada, factor este pautado também pela evolução e surgimento de novos materiais assim como das evoluções significativas no estudo de várias áreas que acabam por entroncar com o ramo de hidráulica. Como qualquer forma de evolução praticada pelo homem, os resultados surgem sempre que se ensaia uma nova solução e esta se afirma como válida para o propósito com que foi concebida. Este tipo de ensaios vêm sendo levados a cabo com maior frequência devido à perene necessidade de adaptação do homem ao meio que o circunda, sendo que os estudos relacionados com hidráulica não foram excepção. Da construção de uma barragem com poucos tipos de materiais até à complexidade que hoje se pratica percorreu-se um longo caminho de experimentação e afirmação dessas soluções.

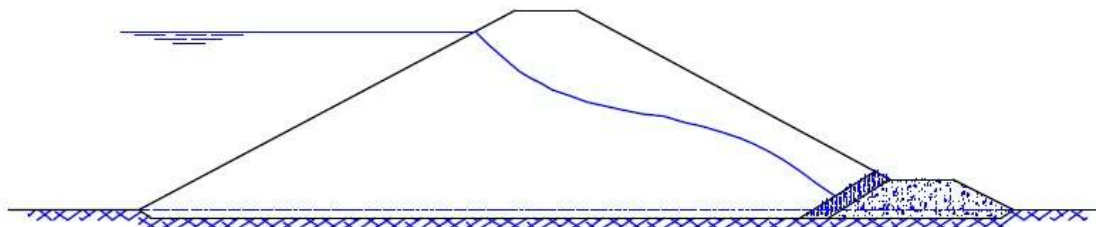
Independentemente do perfil-tipo utilizado, este tem de verificar sempre o princípio de que a percolação é garantida, as cargas do corpo são sempre transmitidas à sua fundação e que os materiais não se desagregam, para além do propósito de retenção de água.

Um dos perfis-tipo de barragens de aterro com o seu conceito mais arcaico é o perfil-tipo de barragem em terra homogénea, conforme Figura 3, em que todo o corpo de barragem é composto maioritariamente por um tipo de solo que não favorece a permeabilidade mas que serve o propósito de percolação do mesmo. São geralmente utilizados solos com características argilosas mas podem também ser utilizados solos mais permeáveis, casos de areias e cascalhos arenosos. É um tipo de solução que utiliza todo o maciço para controlo de percolação pelo que se torna numa solução instável, podendo ocorrer erosões internas e fluxos de água emergente na face jusante da barragem (Caldeira *in* INAG, 2001).



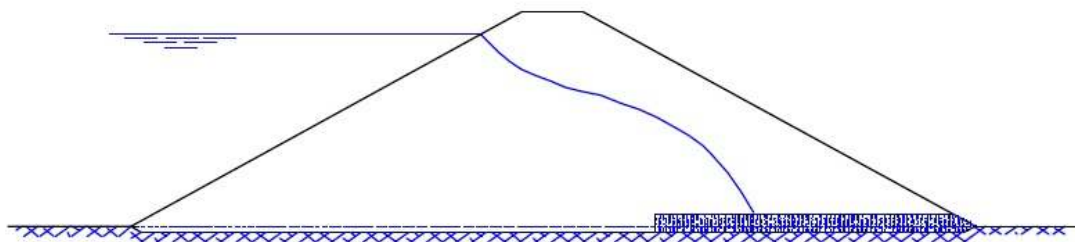
**Figura nº 3 - Exemplo de perfil-tipo de uma barragem de terra homogénea (Lança, 1997).**

Devido a este facto foram desenvolvidos estudos que permitissem ao tipo de solução de terra homogénea ser viável com a introdução de drenos no seu corpo, sendo que numa primeira fase foram introduzidos drenos de pé de jusante que permitiram uma melhoria na conservação do corpo de barragem com diminuição de erosões internas. O dreno serve o propósito de dissipação de água excessiva contida no corpo de barragem sendo constituído por material permeável (areias finas para o filtro fino e areias com cascalho para o filtro grosso). Após o dreno, surgem enrocamentos que variam de granulometria conforme a sua evolução para fora do corpo de barragem, desembocando em enrocamento grosseiro que permite um transporte de água mais facilitado e que desempenha a função de protecção contra a ondulação das marés. Este tipo de soluções pode ser utilizado em locais de baixo risco e para barragens com altura até 10 metros. Para se ter uma ideia da sua forma, consulte-se a Figura 4.



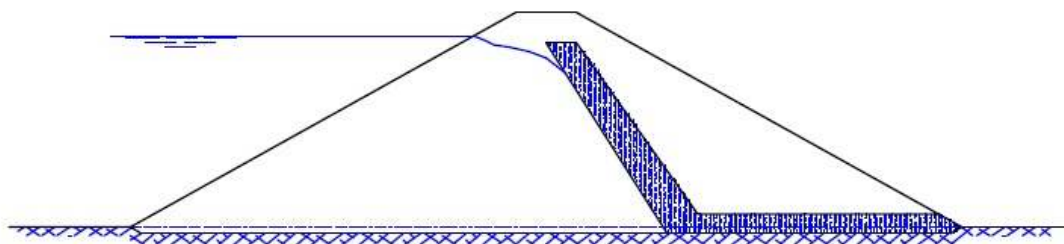
**Figura nº 4 - Exemplo de perfil-tipo com terra homogénea e dreno no pé de jusante (Lança, 1997).**

Outra evolução estudada posteriormente à atrás referida foi a introdução de um tapete drenante (Figura 5) na base de jusante do maciço que permite uma rentabilidade melhor do que a solução anteriormente proposta, sendo que o tapete drenante é constituído por material semelhante ao anteriormente proposto. Com este propósito buscou-se uma maior área de contacto do dreno com a fundação para que o paramento de jusante se encontrasse, num cenário ideal, totalmente seco visto que se permitiria uma extracção de água do corpo de barragem mais efectiva. Tal facto melhorou um pouco a solução de dreno no pé de jusante contudo ficou aquém do pretendido uma vez que é possível que a água circule pelo corpo de barragem sem intersectar o tapete drenante resultando num paramento a jusante húmido. Este facto verificou-se mais eficiente face ao anterior mas não tão efectivo para ser utilizado com regularidade até aos dias de hoje, sendo que estes tipos de soluções são implementadas em zonas de risco baixas a média e com alturas de barragem que não excedam os 10 metros.



**Figura nº 5 - Exemplo de perfil-tipo com terra homogênea e tapete drenante (Lança, 1997).**

Outra teoria estudada foi uma solução de drenos tanto horizontais (materializadas num tapete drenante) como uma solução vertical que se designa como chaminé drenante (Figura 6). Assim, para além da solução de captação de águas horizontais, passou a existir uma solução vertical que se materializa com areias e cascalho altamente permeáveis, permitindo então um escoamento mais eficiente. Este tipo de solução está mais próximo da unidade do quociente de permeabilidade sendo que é aplicada com alguma regularidade e, se a base da barragem for dimensionada para ser um filtro da fundação, permite então o controlo da erosão interna superficial da fundação. De ressaltar que a construção da chaminé drenante se executou de forma vertical mas esta mesma forma pode originar alguns problemas de tensão devido a heterogeneidade de materiais nas zonas de contacto e suas deformações, sendo que se testou com sucesso a solução de chaminé drenante na diagonal, geralmente fazendo a exaustão de água no seu paramento de jusante (de salientar que existem soluções de chaminé inclinada para o paramento de montante igualmente válidas no seu propósito). Este tipo de solução é ainda hoje praticada porque o sistema de drenos ligados, assim como a introdução de drenos horizontais extras, diminuem bastante o risco de erosão da barragem e permite um funcionamento adequado da mesma sem problemas de maior no paramento de jusante. Sendo assim, é utilizada em zona de elevado risco e enquadra-se em soluções de barragens com alturas entre 30 metros a 50 metros.



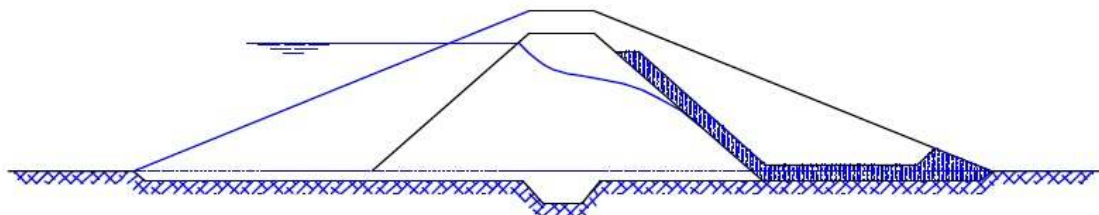
**Figura nº 6 - Exemplo de perfil tipo de terra homogênea e sistema de drenos horizontal (tapete drenante) e vertical (chaminé drenante) (Lança, 1997).**

Uma das primeiras soluções de perfis-tipo zonadas terá sido a conjugação de argila e terra na mesma solução. O aspecto mais importante a ter em conta será calcular o quociente de permeabilidade dos diferentes materiais para que seja compatível com a percolação do corpo de barragem.

Uma das soluções mais populares será um perfil-tipo de terra e enrocamento com um núcleo central de argila. Este tipo de solução caracteriza-se por possuir um sistema de drenagem eficiente que se constrói, do seu interior para exterior, com um núcleo de



argila, portanto um material com boas propriedades de estanquicidade, uma camada de terra constituída com material fino (ex. areias finas), uma camada de material de enrocamento fino (neste caso enrocamento fino de várias ordens) e por fim, uma camada de material de enrocamento grosseiro. Este tipo de solução possui também drenos constituídos por areias finas ou areias com cascalho a jusante do núcleo enquanto que a montante possui uma chaminé drenante constituída por areia com cascalho mais grosseiro. O objectivo deste tipo de perfil é que a percolação de água seja feita para que se concentre junto à fundação a jusante do núcleo de barragem ou que a percolação seja feita através dos filtros drenantes, resultando então num paramento de jusante seco. Este tipo de solução é utilizado quando se pretende a sua implementação num tipo de zona com risco elevado e para soluções que se pretendam para grandes alturas (a título de registo já se construíram barragens com este tipo de solução para alturas próximas dos 300 metros). Este tipo de perfil não tem um resultado prático de aplicabilidade a barragens com altura inferior a 20 metros, devido à complexidade construtiva e aplicação económica da mesma. Existem ainda alguns tipos de barragem em que o núcleo se encontra inclinado acompanhando o paramento montante apresentando algumas vantagens relativas ao núcleo centrado (como por exemplo o material utilizado no núcleo do paramento ser francamente inferior à solução de núcleo central) contudo deve-se atender a que os taludes deste tipo de solução têm obrigatoriamente de ser menos inclinados, podendo esta condicionante ser relevante na ponderação de construção deste tipo de perfil.



**Figura nº 7 - Exemplo de barragem com núcleo central (Lança, 1997).**

Existem ainda outro tipo de soluções como a aplicação de cortinas de betão no interior do corpo de barragem ou no seu paramento. Este tipo de soluções apresenta resultados de estanquicidade melhores do que as de núcleo argiloso contudo podem existir alguns problemas de aplicação devido ao peso do betão não ser compatível com o do solo adjacente, provocando então assentamentos do corpo de barragem que podem ser preocupantes. Para além do betão, foram ensaiados outros materiais a aplicar no paramento de montante como foi o caso de placas de metal (que garantiram bons resultados mas acarretam consigo elevados custos e possibilidade de corrosão) e membranas plásticas (que apresentam bons resultados mas uma ruptura pequena na membrana pode comprometer seriamente o propósito de aplicação do material) que apesar do seu contributo, carecem de melhores relações investimento/aplicabilidade esperando-se que no futuro possam vir a constituir-se como opções válidas na sua aplicação (Caldeira *in* INAG, 2001).

### 2.3.3. Materiais utilizados em barragens de aterro

Conforme se percebeu no subcapítulo anterior, as barragens de aterro permitem a utilização de um leque variado de materiais a aplicar na sua construção. Uma vez que os materiais aplicados não se encontram na sua forma de repouso, deve ser observada com especial atenção a compactação dos mesmos assim como o ângulo de atrito que cada um deles permite, sendo então que os taludes sejam dimensionados com base nessas premissas de forma a evitar acidentes. Uma desagregação de material pode resultar num deslizamento que, para além de poder comprometer a integridade estrutural do corpo de barragem, pode potenciar danos tanto a nível de perdas humanas, como económicos ou ambientais.

Alguns dos materiais utilizados com maior generalidade em diversos tipos de perfis-tipo são os enrocamentos e areias.

Os enrocamentos dividem-se em dois tipos: Enrocamento grosseiro e enrocamento fino. O enrocamento grosseiro serve como interface entre o corpo de barragem e corpos de água tanto da albufeira como resultante de jusante da barragem ou ainda de água das chuvas. Deve-se ter especial atenção a este material uma vez que é aquele que se encontra aplicado no exterior logo sujeito a maior desgaste por parte das intempéries e, que ao estar mal compactado, pode deslizar causando prejuízos significativos. O enrocamento fino é um tipo de enrocamento com uma granulometria de menor dimensão do que o grosseiro mas não possui capacidade de ser denominada de solo fino (recorde-se que pela classificação granulométrica de solos, um solo é fino se for constituído por siltes). Podem ser usados pedaços de rocha bastante degradados na sua composição assim como areias muito grosseiras.

As areias são utilizadas sobretudo como drenos sendo que quando se procura ter um tipo de dreno mais compacto, usam-se areias finas com esse propósito. Se o pretendido for ter um dreno que não seja tão compacto, poder-se-á utilizar areias com cascalhos que variam na sua granulometria conforme o propósito a que são sujeitas.

A argila é também utilizada na construção de barragens sendo que, devido à sua capacidade de estanquidade e ao preço acessível que este tipo de material permite, tem então grande aplicação em núcleos de corpo de barragem uma vez que apresenta um desempenho bastante satisfatório no controlo de percolação de água no maciço de barragem.

A natureza de materiais como betão, chapas metálicas ou membranas plásticas depende do propósito e utilização a dar à barragem.

O betão utilizado como cortina impermeável será betão armado que poderá ser reforçado por uma cortina de argila apenas para colmatar eventuais defeitos que possam existir no propósito que a cortina desempenha.

As chapas metálicas e membranas plásticas são, conforme referido anteriormente, revestimentos que se encontram em fases de ensaio sendo que, devido a não serem viáveis a nível económico, se espera que possam ser aplicados no futuro conforme a evolução destes e sua aplicabilidade ao propósito de controlo de percolação no corpo da barragem.



#### 2.3.4. Tipos de falhas mais comuns em barragens de aterros

Uma barragem possui, por ela própria, um factor de risco associado. Este factor de risco é variável consoante o tipo de falha que nela decorrerá e conforme a ponderação de afectação que este tipo de estruturas acarreta por ela própria. O maior risco que uma falha numa barragem pode originar é a libertação da massa de água contida na albufera sobre o vale a jusante, originando incalculáveis prejuízos e até perdas humanas.

Pode-se distinguir a natureza de acidentes em duas formas distintas de ocorrência: uma de natureza accidental e outra de natureza humana.

Os erros de natureza accidental são aqueles que não têm intervenção directa do homem, sendo que é neste grupo que se encontram acidentes atribuídos a factores naturais como sismos, cheias e factores associados a mecânica dos solos (se bem que estes podem ter origem em problemas de ausência de acautelamento de certos factores devido a erro humano).

Os erros de natureza humana são aqueles que são atribuídos a uma intervenção directa do homem. Os erros de cálculo são os factores que têm maior preponderância de acontecer neste tipo de erros contudo não se deve menosprezar erros relativos a deficientes manutenções, gestões danosas de património da barragem, deficientes planos de estudo, construção deficitária ou mesmo actos associados a ordem criminosa, como por exemplo a explosão intencional de uma barragem.

No caso de barragens de aterro existem acidentes que se manifestam de forma variada que podem comprometer seriamente a estrutura de barragem.

O caso mais comum de falha neste tipo de barragens deve-se ao galgamento. Pode dar-se por cheias a montante da barragem originando o transbordo de água acima no NMC, podendo este factor originar falhas de desgaste no corpo de barragem enfraquecendo assim a estrutura ou criar uma onda de inundação que transponha o corpo de barragem causando prejuízos avultados. Na origem deste tipo de situação podem estar factores como dimensionamento deficiente da descarga da barragem, o espaço atribuído a descargas encontrar-se obstruído com entulho não permitindo um escoamento razoável, um deslize de terras significativo com um volume de terras movimentado que obrigue à superação do NMC, por ocorrência de sismos, etc.

Outro fenómeno que deve requer grande controlo por parte dos grupos de trabalho é o fenómeno de erosão interna ou *piping*. O *piping* resulta de erosão interna do material que compõe a barragem originando a degradação das suas propriedades e objectivos sendo que, em caso último, pode originar uma falha do corpo de barragem. Este fenómeno manifesta-se pelo desgaste originado pela água que forma pequenos tubos ao longo do corpo de barragem, resultando na ausência de solos finos do corpo da barragem comprometendo assim a sua integridade estrutural. Na origem desta anomalia podem estar factores como uma deficiente escolha de materiais a aplicar, uma monitorização desadequada como a realização de ensaios periódicos ou má compactação de materiais.

Outro aspecto a ter em conta é o da degradação das condições de solo da fundação. Se este não for bem dimensionado e compactado, pode originar problemas de coesão de

material do corpo de barragem, podendo resultar, por exemplo, em factores como intensificação do fenómeno de *piping*.

As cheias e os sismos são realidades transversais a todo o tipo de barragens. Estes são factores naturais que não podem ser monitorizados, quanto muito podem ser minimizados através de dimensionamentos estruturais adequados à realidade da região de implantação da barragem em estudo. Estes são factores que podem ameaçar severamente a integridade da estrutura podendo assim originar situações catastróficas.

Os sismos podem provocar falhas de várias ordens dependendo da intensidade com que estes afectam a barragem. Apesar de se ensaiarem e dimensionarem os elementos de barragem para resistir a um sismo, a natureza destes pode originar Rupturas de solos comprometendo assim a fundação da barragem, originando ondas que provocam galgamento da barragem. Apesar de se ter sempre em conta os critérios de dimensionamento sísmológico, este tipo de acidentes é sempre de difícil previsão devido ao carácter de variedade na sua afectação na barragem.

As cheias são também um tipo de acidente que requerem uma monitorização constante visto que é o fenómeno natural com maior apetência para ocorrer e ameaçar a barragem. Este tipo de fenómeno é controlável se não ocorrer um enchimento de albufeira anormal (cheias dos 500 e 1000 anos) desde que o dimensionamento e manutenção da barragem sejam adequados, sendo que o objectivo é reter as águas de cheia na albufeira até ao NMC.

Quanto a erros humanos, o mais usual de acontecer é o deficiente dimensionamento que, conforme visto anteriormente, pode resultar em praticamente todo o tipo de falhas conhecidas em barragens. De forma a minimizar este tipo de erro deve-se ter especial atenção ao trabalho desenvolvido no dimensionamento da barragem e rever todos os elementos até estes serem válidos. No dimensionamento deve-se, sempre que possível, ter em conta uma folga que se traduzirá numa maior segurança para o corpo de barragem. Outros aspectos a ter em conta em termos de erro humano são deficientes manutenções de barragem, má construção, má utilização, etc.

Em termos de barragens de aterro tem-se ainda que ter em atenção a situações como a percolação junto dos encontros da barragem. Apesar de parecer uma questão menor este tipo de falha pode comprometer o corpo de barragem, enfraquecendo um ponto já de si sensível e podendo posteriormente originar falhas na subsidência de materiais.

Este ponto teve um forte contributo da consulta de ICOLD, 2001.

## **2.4. Contextualização de apreciação de riscos em estudo de grandes barragens**

### **2.4.1. Gestão de riscos**

A gestão de riscos é uma disciplina reconhecida pelo carácter de utilidade em áreas como a Economia, a Mecânica, Engenharia Petrolífera e outras tantas mais actividades, tendo ganho algum reconhecimento junto da comunidade de Engenharia Civil contudo,

ainda apresenta alguma resistência nesta classe devido ao seu carácter de desconhecimento e pouca utilização na área de estudo, podendo inclusive trazer morosidade nos processos de decisão e o incremento do factor economia num trabalho relativo a barragens.

Apesar destes contras, a gestão de risco é uma mais-valia aquando do estudo de uma obra com carácter de grande utilidade e grande aplicação para a sociedade onde se insere, sendo este o conjunto onde, por norma, se inserem a construção de grandes barragens. O seu principal benefício reconhecido é o estudo exaustivo das componentes de barragem e a tradução deste estudo numa resposta concreta e precisa para a decisão da execução do projecto, avaliando qual a melhor opção a tomar.

Para perceber o real conceito do assunto em estudo, importa primeiro definir alguns conceitos que lhe são estritos. Um destes conceitos é o de risco, que tem vindo a sofrer alterações na sua definição conforme existem evoluções na forma de trabalhar sobre a gestão de riscos. O conceito *risco* é importante na medida que não é apenas o conceito em si que importa mas todas as variações que este acarreta e são cruciais para o trabalho da gestão de risco. À luz dos conhecimentos que se praticavam nos anos 90 do século passado, o risco era separado em duas áreas:

- Risco potencial – Corresponde à quantificação das consequências de um acidente (ex. o número de vítimas no vale a jusante), independentemente da probabilidade de ocorrência (RSB, 1990).
- Risco efectivo – Corresponde ao produto do risco potencial pela probabilidade de ocorrência do acidente com ele relacionado, num determinado período de tempo ou de vida da obra (RSB, 1990).

Estas definições evoluíram para um aspecto mais centrado sobre cada temática. Ficam então algumas definições utilizadas que acompanharão o desenvolvimento do trabalho. Todos os conceitos de risco de seguida desenvolvidos foram obtidos de Baptista, 2009.

- Risco – Medida de probabilidade e da severidade de uma ocorrência com consequências humanas, socioeconómicas ou ambientais diversas.
- Risco aceitável – Risco que a sociedade ou indivíduo potencialmente interferido estão preparados para aceitar, sem quaisquer alterações ao nível das medidas de controlo de riscos (ainda que se considere que deve sempre ser verificado o princípio *As Low as Reasonable Possible* - ALARP).
- Risco intolerável – Risco que a sociedade ou o indivíduo potencialmente interferido não estão dispostos a tolerar.
- Risco tolerável – Risco superior ao aceitável e inferior ao intolerável (intervalo de tolerabilidade) que a sociedade ou indivíduo potencialmente interferido estão dispostos a tolerar, de forma a assegurar determinados benefícios e no pressuposto deste ser mantido sob controlo e de ter verificado o princípio ALARP.
- Risco involuntário – Risco que é imposto à sociedade ou ao indivíduo potencialmente interferido.
- Risco voluntário – Risco que a sociedade ou indivíduo potencialmente interferido estão preparados para aceitar, de modo a obter algum benefício.
- Risco individual – O incremento de risco imposto a um indivíduo pela existência de uma unidade industrial perigosa, no caso em análise, de uma barragem.

- Risco societal – Risco associado a consequências catastróficas (por exemplo, perdas de vidas humanas e feridos graves, elevadas perdas económico-financeiras, danos ambientais, etc.) com grande impacto na comunidade afectada e na população em geral, captando a atenção dos meios de comunicação e resultando em intervenções de poder político.

A gestão de riscos deve ser entendida como uma soma de várias actividades que decorrem segundo uma estrutura organizada. Num nível mais global, uma gestão de riscos aplicada a barragens deve compreender primeiro a avaliação de riscos, que se divide em análise de riscos e a apreciação de riscos sendo que após este passo transita para o controlo de riscos. Um sistema de gestão de risco aplicado a barragens ocorre primariamente mediante um processo de análise de risco que busca como objectivo último a estimativa de risco, mediante um estudo exaustivo do órgão de barragem e análise ponderada dos factores que nela intervém. Após este ponto existe uma apreciação de risco, sendo esta elaborada mediante uma comparação entre a estimativa de risco alcançada anteriormente com os critérios de tolerabilidade e aceitabilidade para a afirmação da actividade proposta. Após este trabalho o projecto entra no grupo de controlo de riscos que compreende um processo de decisão seguido de mitigação, prevenção, detecção, planeamento de emergência e revisão. Se todo este sistema for validado, então o processo será comunicado através das autoridades competentes enquanto que se não se verificar a sua validação, voltará à avaliação de riscos percorrendo o mesmo ciclo diversas vezes até que todo o processo seja validado. Esta esquemática está patente na Figura 8.

Pode definir-se então a gestão de risco aplicada a barragens como um “desenvolvimento integrado das actividades de avaliação de risco (análise de risco e apreciação de risco) e de controlo de risco (decisão, mitigação, prevenção, detecção, planeamento de emergência, revisão e comunicação)” (Baptista, 2009). Para uma melhor compreensão, atente-se à Figura 8 que explana a ideia de como a gestão de riscos é constituída:



Figura nº 8 - Esquemática básica de funcionamento de gestão de risco (baseado em Baptista, 2009)

Importa agora definir cada área, de uma forma geral, a que correspondem os constituintes da gestão de riscos.

#### ***2.4.2. Avaliação de riscos***

Compreende o conjunto de actividades de análise de riscos e apreciação de riscos. É então a primeira fase da gestão de riscos onde se recolhe a informação, se estuda a mesma, é processada e sujeita a debates de ordem política e social, tendo sempre em conta o respeito pelas normas vigentes de cada país ou, em caso de inexistência, regulamentação de instituições relacionadas com a temática (Almeida, A., 2006).

A análise de riscos é considerada a componente técnica num trabalho de gestão de riscos. Nesta fase, pretende-se reunir o máximo de informação disponível sobre o projecto de barragem para que se possa abarcar todas as componentes no estudo da estimativa de risco. Após a reunião de componentes, estas são estudadas e processadas em sistemas de identificação visual imediata que podem ser de vários propósitos, sendo que o objectivo é a discretização mais pormenorizada possível das actividades existentes (Hill, 2011). Partindo da solução obtida com a identificação de sistemas, deve configurar-se uma solução estatística para cada actividade conforme as suas especificidades e objectivo de estudo. É esta simbiose de identificação e probabilidade que irá compor a estimativa de risco (Hill, 2003).

Existem dois métodos para estimativa de probabilidades: o julgamento de engenharia e estimativas estatísticas com base em dados históricos.

O julgamento de engenharia baseia-se em análises de probabilidades tendo em conta a experiência do engenheiro envolvido no projecto. Tendo em conta o seu carácter de análise, esta metodologia por si só não é assertiva se a opinião individual não for confrontada e refutada por outros colegas. Incorre-se no risco de uma perspectiva singular tendo em conta que esta pode acarretar maus juízos da parte de quem interpreta e pode induzir em erro os cálculos posteriores.

A estimativa estatística com base em dados históricos é feita, conforme o nome indica, em acontecimentos documentados que se enquadram no estudo de probabilidade. Este tipo de estudos é baseado em consultas bibliográficas ou de bases de dados existentes com a finalidade de aferição da probabilidade de certa actividade se enquadrar numa realidade semelhante à do caso de estudo. Apesar de mais fiável do que o julgamento de engenharia, este método tem como contra o facto da constante evolução das barragens, facto este que se pode traduzir num desagravamento do factor de risco que, por sua vez, se traduzirá em reduções de probabilidades de ocorrência de certas actividades. Estas, se não forem devidamente acompanhadas, incorrem no risco de ficarem obsoletas e mal calibradas, não servindo o propósito a que foram destinadas.

Uma utilização conjunta destas metodologias será a escolha mais acertada para aferir as probabilidades em estudo, tendo sempre em conta a constante actualização de resultados de estudos desta natureza.

Após a análise de riscos, a estimativa de risco será sujeita a uma revisão que passará pela sua aceitação junto da legislação vigente à data do estudo preconizado. A este processo chama-se apreciação de risco.

É neste ponto que importa estabelecer um paralelo com tipos de estudo e situações semelhantes com o objectivo de validar a ideia de construção de barragem junto dos poderes decisórios e depois junto da população. Idealmente, os estudos preconizados na análise de risco serão debatidos junto das populações e seus governantes para que lhes sejam explicados quais os objectivos da construção, os benefícios e malefícios inerentes à construção da barragem, num caso de necessidade de deslocalização devido a inundação da albufeira quais os planos que foram desenhados para contemplar esta situação, qual o risco inerente à sua construção, etc. Em suma, é uma fase ponderativa junto do factor humano se, aos olhos dos seus reais utentes, a sua construção é válida.

É também importante que a apreciação de risco seja debatida mediante os conceitos de risco aceitável e risco tolerável, conceitos que serão posteriormente desenvolvidos

### **2.4.3. Controlo de riscos**

Se a avaliação de riscos for validada, entra-se na fase final da esquemática da gestão de riscos. Nesta fase procura-se uma decisão final sobre se a barragem justifica o seu investimento, sendo que se for válido, proceder-se-á a um planeamento que compreende cinco fases:

#### Mitigação

Procede-se à elaboração de um estudo de “medidas (estruturais e não estruturais) para a mitigação de riscos.” (Baptista, 2009). As medidas em análise devem ser comparadas com outro tipo de soluções semelhantes para justificar as componentes económica e técnica.

#### Prevenção

Planeamento que compreende uma visão geral sobre as manutenções que serão requeridas ao longo da vida útil da barragem, assim como o planeamento de ocupação do vale a jusante, etc.

#### Detecção

Planos que compreendem a inspecção e observação da barragem através de um grupo de estudo. Neste ponto procura-se então a realização de ensaios, medições, análises laboratoriais, etc., ou seja, todo o trabalho de campo sobre a observação directa da barragem.

#### Planeamento de emergência

Procuram-se estudar quais as melhores soluções de evacuação em caso de Ruptura da barragem, onde implementar os sinais sonoros, qual o plano que deve ser seguido no caso de algum problema surgir, quais as articulações entre órgãos e atribuição das suas competências, etc. Por norma, o planeamento de emergência vem expresso em documento próprio.

## Revisão

O objectivo da revisão é o de periodicamente estabelecer contacto com os aspectos abordados na gestão do risco e garantir a conformidade do processo.

Após se percorrer todo o percurso do controlo de riscos dá-se um dos dois casos: comunicação primária às entidades envolvidas no projecto da barragem e posterior transmissão do resultado do estudo, seja este favorável ou não; ou em caso de não existir conformidade em algum ponto do projecto procede-se a um retorno à avaliação de riscos voltando a percorrer todo o processo até este ser devidamente validado em todos os seus parâmetros.

Para uma compreensão visual das articulações desenvolvidas neste ponto, deve observar-se a Figura 9.

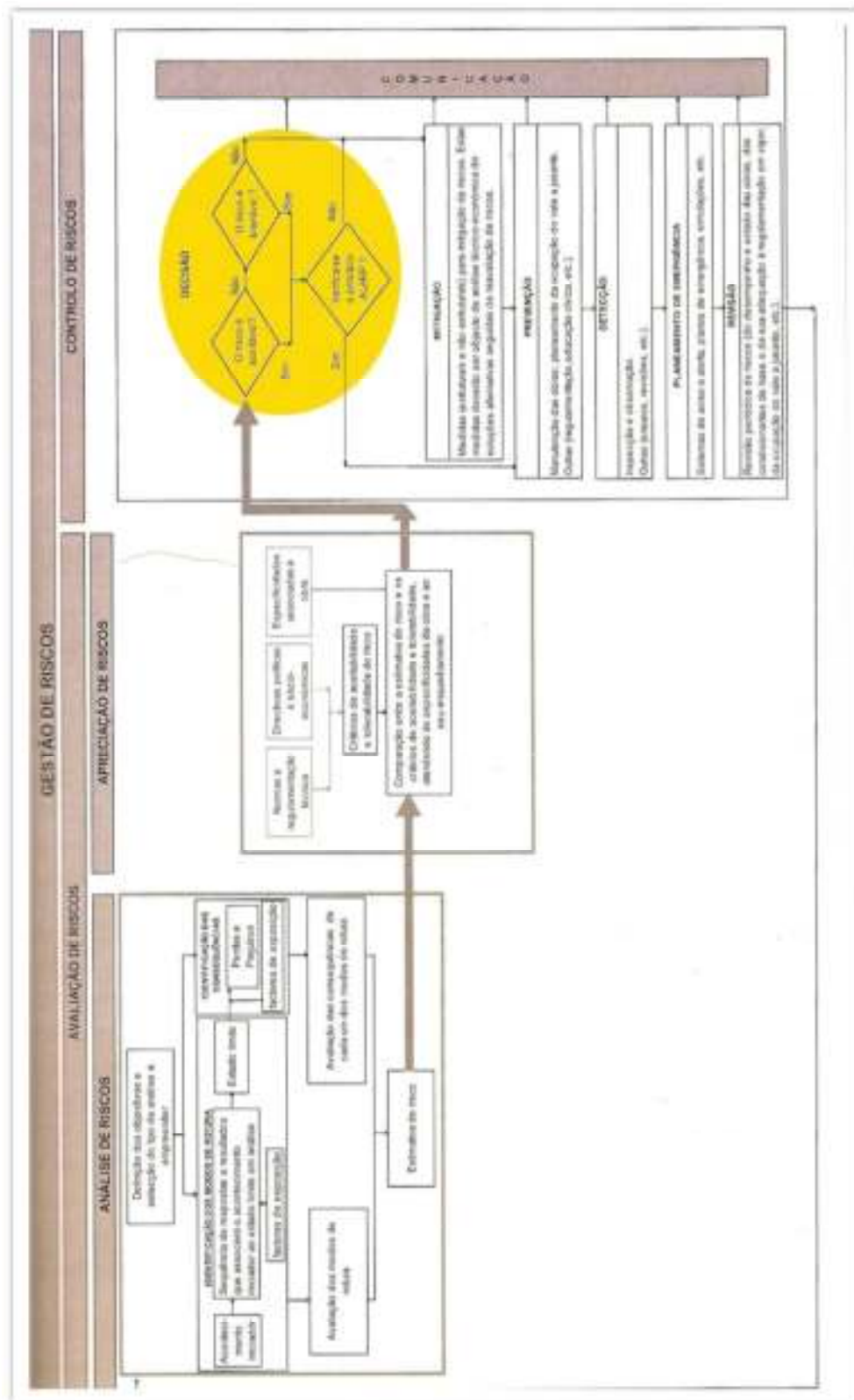


Figura nº 9 - Esquemática geral do procedimento de gestão de risco (Baptista 2009).



## **2.5. Apreciação de Riscos**

### **2.5.1. Introdução**

A apreciação de riscos é a componente que permite agrupar e debater a noção de risco junto das populações, poderes políticos e legislação. É a face da aplicação de psicologia, antropologia e sociologia na área de estudo do risco uma vez que as disciplinas se tornam fundamentais no conhecimento dos aspectos de vivência da população e transmissão do risco a esta. A par destas disciplinas, na apreciação de risco também se têm em conta factores ambientais e arqueológicos.

A apreciação de risco inicia-se após o tratamento de dados e respectiva atribuição de probabilidades a cada consequência de falha de uma barragem resultantes da análise de riscos sendo que, numa fase inicial, se procura estudar o contexto social onde o projecto de barragem será realizado. É fundamental perceber quais as vivências praticadas pelos indivíduos afectados de forma a conseguir reproduzir uma boa esquemática de transmissão de conhecimentos a estes. O objectivo último desta fase é o de munir o estudo efectuado com instrumentos de medição que sejam adequados e perceptíveis junto daqueles que dele irão usufruir.

A noção de risco torna-se então importante visto que é um conceito transversal ao ser humano já que cada indivíduo atribui um valor quantitativo e/ou qualitativo ao risco a que está sujeito. O risco é um conceito omnipresente na vida humana visto que qualquer actividade desempenhada pelo homem possui um risco associado. Para além do carácter individualizado do mesmo, o risco é um conceito dinâmico que permite uma mudança na sua percepção devido a um evento que tenha sucedido, podendo então existir uma mudança na percepção original de risco. O carácter individualizado de risco prende-se com todas as áreas de formação do indivíduo e contexto onde se insere. Foram desenvolvidos variados estudos sobre a temática e concluiu-se que, de uma forma generalizada, uma formação académica superior e/ou um contexto de vivência em níveis económicos mais favorecidos conduzem a comportamentos sobre a percepção de risco menos temerosos do que quando comparada com indivíduos que apresentavam competências menos desenvolvidas nas mesmas áreas (Baptista, 2009).

O risco depende de todos os factores e interpretações que os indivíduos deles fazem. Estes factores revelam-se através de estímulos que o indivíduo vai absorvendo pelo que o rodeia. Estes estímulos são de variadas ordens como o sexo do indivíduo, idade, etnia, formação académica, país, região, etc.

Uma das premissas para a qual o risco deve assentar é no seu debate com o máximo de informação disponível por parte dos seus intervenientes. Um dos factores pelos quais o risco é por vezes empolado é pela falta de informação que o indivíduo possui, reproduzindo informações que podem ser manipuladas com determinados fins, como por exemplo, a informação veiculada pela comunicação social que tende a empolar acontecimentos trágicos quando estes ocorrem. Para um debate sobre risco, é necessário que os seus decisores estejam receptivos à comunicação e que as suas ponderações sejam devidamente estruturadas de acordo com a informação processada sobre a temática. Uma reprodução de opinião não fundamentada não acrescenta qualidade ao debate sendo que até pode introduzir morosidade na conclusão do mesmo.

Num canal comum de comunicação de risco sobre barragens, a percepção de risco é primeiro debatida junto de grupos especializados das mais diversas áreas intervenientes no projecto com o propósito de reprodução de informação validada junto dos poderes decisórios, sendo posteriormente debatida junto destes através de debates em assembleias municipais ou até nacionais (mediante importância do projecto) acerca da viabilidade do projecto sendo obrigatório o respeito pelas normas pré-estabelecidas. Numa fase final, o assunto é debatido junto da população esclarecendo-a sobre a temática e promovendo o debate junto desta.

A apreciação de risco é então a fase de gestão de risco onde se promove o debate e se criam sinergias entre os mais variados grupos de intervenção sobre barragem. Em última instância é nesta fase que se podem alterar ou até criar novas legislações sobre as temáticas correntes depois de o tema ser amplamente debatido e que assim se justifique. Esta fase resultará na reprodução de análises de riscos num carácter de compreensão mais amplo desta vez dirigido às populações e poderes decisórios.

Os estudos realizados numa apreciação de risco têm em conta que para um possível cenário de perda, existirá sempre um valor económico que o justifique. A principal polémica relacionada com esta área é porque nela se decide qual o valor a ponderar para as perdas, incluindo as perdas humanas, apenas tendo em conta questões relacionadas com economia. A apreciação de risco é um forte contributo para a vertente económica uma vez que é nesta área que se percebe se o investimento é compensatório ou não.

A par desta situação surgem os conceitos de aceitabilidade e tolerabilidade. A aceitabilidade passa pela aceitação de que uma barragem comporta sempre um factor de risco e, face a esta situação, assume-se o risco devido ao benefício que este tipo de estrutura trará. A tolerabilidade é um conceito mais evoluído que a aceitabilidade na medida em que também existe a percepção de risco na construção de uma barragem contudo explora-se qual o limite imposto em termos de segurança, nomeadamente do vale a jusante, para que seja viável a sua construção.

Um exemplo de como a apreciação de riscos tem utilidade foi a temática relacionada com a construção de uma barragem na zona de Foz Côa. Foram descobertos desenhos em paredes que reportam ao Paleolítico, facto este que desembocou num amplo debate público sobre a viabilidade da construção da barragem face ao achado arqueológico formando-se duas posições antagónicas: um partido político apoiava a construção da barragem enquanto o outro era a favor da conservação das imagens, podendo assim potenciar interesse económico na região. Acabou por prevalecer a ideia de conservação das gravuras que era a posição defendida pelo partido que ganhou as eleições no mesmo ano (Gomes, R.).

Dentro desta temática importa ainda distinguir dois conceitos para uma melhor percepção do contexto da apreciação de risco. São eles o risco individual e o risco societal.

### 2.5.2. Risco individual

O risco individual é aquele que se relaciona directamente com o indivíduo e deve ser compreendido não apenas na sua singularidade como pessoa mas como todos os estímulos que lhe são adjacentes. Um exemplo de aplicação de risco individual é o indivíduo realizar qualquer tipo de actividade, como por exemplo, pesca submarina. Esta afirmação de risco justifica-se devido a variados factores como depoimentos históricos que corroboram essa situação, a existência de factores externos que podem condicionar uma prática mais segura desta actividade, a forma como a actividade é vista pela população em geral, etc.

O risco individual deve ser entendido então como o risco resultante da exposição a que uma pessoa se encontra aquando da sua vivência. Esta exposição traduz-se na actividade que o indivíduo desempenha, no seu local de vivência, se faz parte de um grupo de risco ou não, se tem consciência de que o seu risco é voluntário, etc.

Com a finalidade de se obterem resultados específicos, foram elaborados estudos com o objectivo de condensar informação relativa à probabilidade de ocorrência de acidentes nas mais variadas actividades da vida humana. Estes estudos permitiram definir valores que se denominam valores alvo, que se pensam ser adequados para transmitir o nível de risco que cada actividade reproduz, sendo então utilizados como medidas padrão para tolerância de risco. É neste contexto que importa falar de aceitabilidade e tolerabilidade do risco.

A aceitabilidade transmite-se pela aceitação de um tipo de risco que determinado indivíduo está ciente que corre em função de retirar partido de uma mais-valia que lhe é atribuída. Nesta forma, a acção de risco é reduzida, sendo que a actividade referente a esse risco é facilmente aceite e assimilada pelos seus projectistas e população em geral, não dando origem a grande discussão sobre a sua aceitação.

A tolerabilidade é um conceito que explora o valor máximo que se pode atingir sem que ocorra um cenário de Ruptura. Acima do valor de tolerabilidade o risco não compensa a obra quer a título económico quer de perdas, sendo estes geralmente os factores últimos de decisão. Deve ter-se em conta que um factor de risco abaixo do tolerável mas acima do aceitável é sempre alvo de reflexão sobre a viabilidade do mesmo.

Visto que estes conceitos não são mutuamente exclusivos, procurou-se elaborar uma forma de conseguir transmitir a informação processada pela análise de dados mediante situações gráficas. Assim, os dados processados são enquadrados num gráfico sendo que o conceito de aceitabilidade funciona como uma primeira fronteira e o conceito de tolerabilidade funciona como uma segunda fronteira. Originam-se assim três zonas gráficas que correspondem a três níveis de interpretação. A zona inferior, que deriva entre o valor zero e o conceito de aceitabilidade, é denominado risco aceitável sendo que é uma zona na qual o risco não apresenta qualquer problema de monta que inviabilize a sua inclusão no projecto. A zona superior, acima do limite de tolerabilidade, é a zona atribuída ao risco intolerável, aquele que por nenhuma circunstância é viável originando certamente falhas que conduzirão a perdas. A zona intermédia é uma zona de decisão de viabilidade da acção. A esta zona chama-se zona ALARP (As Low as Reasonable Possible) e tem como função a tomada de decisões de entre os factores em estudo sobre os quais se deve intervir com o objectivo de inclusão dessa actividade no projecto de barragem. Claramente que esta intervenção será

ponderada sobretudo a nível económico e a nível da praticabilidade que a actividade desempenhará. Pode-se afirmar então que na zona ALARP se dá a ponderação da viabilidade de uma actividade conforme os trâmites onde esta se irá implantar. Observe-se então a Figura 10 onde se podem observar os factores descritos anteriormente e a forma como interagem.

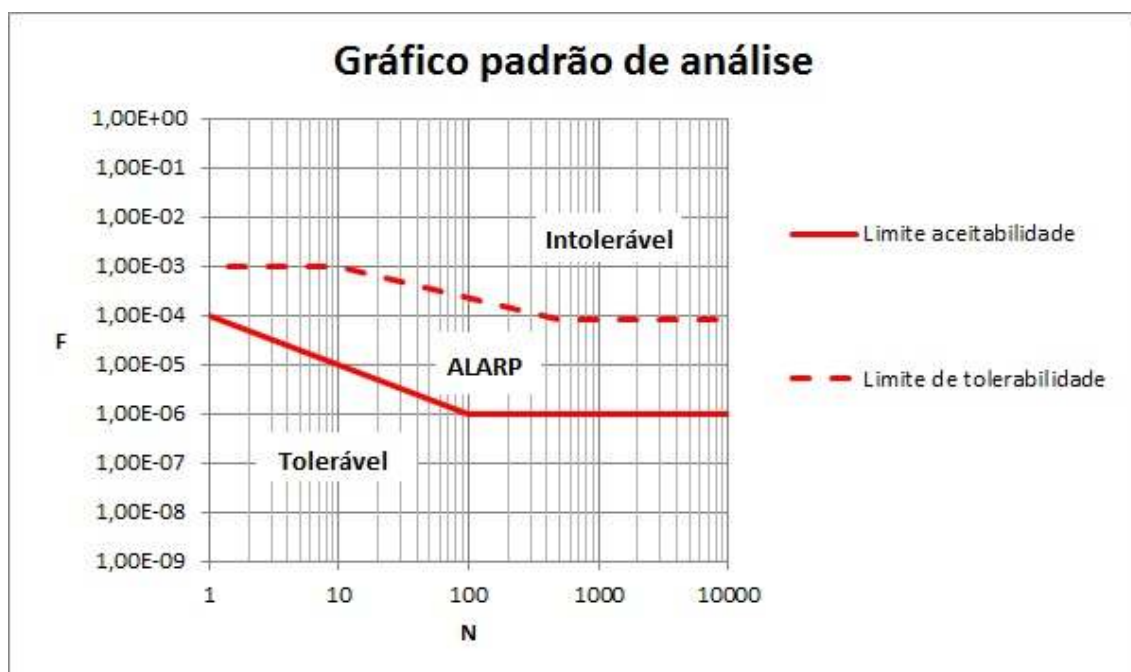


Figura nº 10 - Explicação de limites de aceitabilidade e tolerabilidade (adaptado de <http://www.emeraldinsight.com/journals.htm?articleid=871018&show=html>) em que p corresponde à probabilidade associada ao risco e n representa o número de perdas (de vidas, neste caso) estimadas acima da probabilidade definida.

Este tipo de ponderação empresta um carácter de utilidade bastante apreciável ao estudo do risco sendo que a sua implementação é feita sobretudo a nível empresarial e não de países, portanto é um tema que carece de consolidação junto dos órgãos soberanos de um país, sendo que o único caso de implementação numa regulamentação nacional conhecido é na Holanda (Baptista, 2009).

### 2.5.3. Risco societal

O conceito de risco societal está associado ao número de perdas, sendo que não se avalia o risco atribuído a cada actividade desempenhada pelo homem mas sim às actividades que as grandes indústrias produzem, traduzindo assim o cariz de globalidade e dimensão deste tipo de risco. Então, o risco societal é um tipo de risco associados a elementos de grande escala que podem resultar em grandes perdas. A título de exemplo, é o tipo de risco usado para o desempenho de actividades tidas como perigosas como as indústrias químicas e grandes barragens.

O conceito de risco societal torna-se importante para as grandes barragens devido ao potencial de destruição que estas podem originar aquando da sua ruptura e porque é com este conceito que se elaboram os meios e estudos para alcançar resultados na apreciação de riscos em barragens. Para este efeito devem ser realizados dois tipos de análise: uma análise quantitativa e uma análise semi-quantitativa ou qualitativa. A análise quantitativa é feita mediante análise de dados de cariz numérico que se expressam graficamente. A análise qualitativa é apoiada também em dados de cariz numérico contudo a atribuição do peso que determinada actividade impõe à estrutura possui um carácter numérico enquadrado em escalas de dimensão existentes que se designam de escalas semi-quantitativas ou qualitativas.

A apreciação de riscos societais é uma área ainda em desenvolvimento daí resultar o facto de existir uma constante actualização nas suas formas de procedimento.

Devido a este facto, e com o objectivo de centralizar o propósito desta tese, procede-se a uma análise quantitativa de apreciação de risco que se traduzirá pela análise de gráficos bi-logarítmicos expresso em curvas FX (em que X representa o número de perdas enquanto que F representa a probabilidade associada a perdas de valor igual ou superior a X) e uma análise semi-quantitativa que se desenvolverá mediante a aplicação dos resultados obtidos a uma matriz de risco proposta.

#### **2.5.4. Análise quantitativa de apreciação de riscos**

A análise quantitativa de apreciação de riscos pode ser elaborada de diferentes formas sendo que a mais utilizada será a análise gráfica de curvas FX (ou PX). O tipo de gráfico utilizado é o bi-logarítmico devido à extensão de dados que podem ser reproduzidos mediante esta forma, sendo usual a sua aplicação a projectos de barragem. O eixo das coordenadas deste tipo de gráficos é X sendo que este traduz o número de perdas podendo estas serem de várias ordens, enquanto F (ou P) designa a probabilidade anual de um acidente com um número de perdas iguais ou superiores a X. De salientar que existem correntes de pensamento que propõe um valor de F para um número de perdas superior a X (Bowles e Chauhan referidos em Baptista, 2007).

O valor de X é associado ao número de perdas e é um conceito que varia conforme a interpretação que se procura avaliar. Os casos mais utilizados são o valor de N como fatalidades associadas a perdas de vidas ou o valor de X como tradução em perdas de relação económica, originando um gráfico FC. Uma nova corrente tem vindo a despoletar interesse devido a uma cada vez maior preocupação com os impactos ambientais causados pela construção de barragens. Num caso de ruptura da estrutura, os impactos ambientais podem ser devastadores. Devido a este facto a análise de risco de barragens inclui este parâmetro na sua avaliação, daí utilizarem-se valores de X como perdas ambientais em gráficos de relação com este tema com a designação FA.

A mecânica de funcionamento desta interpretação serve como análise na medida em que se implementam conceitos de aceitabilidade e tolerabilidade no seu procedimento. Conforme descrito anteriormente, a aceitabilidade procederá ao papel de fronteira entre o risco desprezável e o risco ponderado enquanto que o critério de tolerabilidade fará a fronteira entre o risco ponderado e o risco intolerável. Com a introdução dos dados de F e X, verificar-se-á a região onde esses riscos surgirão e, a partir daí, excluir os riscos

que se encontrem na zona de intolerável (ou acima do limite de tolerabilidade), aceitar os riscos desprezáveis (abaixo da linha de aceitabilidade) e ponderar os riscos que se encontram no plano intermédio (que constam da região ALARP).

A implementação de curvas FX surge com a introdução dos conceitos das curvas de Groningen, no final dos anos 70 do século passado na Holanda. A inclinação da recta do limite proposto, que traduz o valor idealizado de aceitabilidade, demonstra o grau de aceitação do risco da entidade. Esta questão é pertinente na medida em que conforme se tem maior aversão ao risco, maior será a inclinação da recta. Com a evolução deste tipo de estudos e da evolução tecnológica verificada em áreas como a construção de barragens, tem-se observado a tendência dos valores de aceitabilidade e tolerabilidade serem menos penalizadores na sua análise, verificando-se então que a tendência será de diminuição do valor de probabilidade e/ou de perdas atribuído ao risco assim como a sua consequência, não validando uma eventual penalização de um factor que se descubra estar inflacionado na sua concepção de aceitação de risco. Estes factores resultam de se possuir um conhecimento sobre risco cada vez mais fundamentado, não existindo a necessidade de atribuição de escalonização tão penalizadora. É também aceitável para o fim de estabelecimento de níveis de aceitabilidade e tolerabilidade que estes valores difiram entre si uma escala entre 100 a 1000 (Baptista, 07).

Alguns dos critérios de risco societal foram baseados em riscos individuais, existindo para o efeito uma análise ponderada entre a aceitabilidade e tolerabilidade em um factor de conversão  $10x$  representando a ordem de grandeza da probabilidade anual máxima da morte de um indivíduo em que  $x$  representa a probabilidade de ocorrência de um acidente com dez ou mais fatalidades (Baptista, 2007).

#### **2.5.5. Análise qualitativa ou semi-quantitativa de apreciação de riscos.**

Este tipo de análise far-se-á de uma forma mais expedita do que a preconizada anteriormente. Procura-se com esta metodologia uma transmissão da ideia de risco mediante uma análise qualitativa associada a escalas que possam ser interpretadas por diversos grupos de pessoas procurando-se assim que a análise seja de interpretação fácil e directa. Um exemplo da importância deste tipo de aplicação será a apreciação de riscos segundo esta metodologia e respectivo debate da comunidade científica junto da comunidade política sobre a interpretação de riscos de barragens com a utilização destes instrumentos. Apesar da existência de diversas formas de se obterem resultados relativos a esta temática, a mais usual é a elaboração de uma matriz de riscos.

As matrizes de risco são elementos que permitem uma análise visual directa mediante o enquadramento do risco numa escala previamente definida, podendo assim verificar-se quais os intervalos de classes e respectiva importância onde se deve inserir a actividade em estudo. A fase inicial de trabalho na matriz de risco é a divisão em classes do grau de probabilidade a estudo e da divisão do grau de importância das classes de consequências que derivam das acções desembocadas. Devido ao carácter de aplicação plural deste tipo de estudo, dificilmente se irá obter uma matriz padrão que sirva o propósito de enquadramento global de uma actividade. Este facto prende-se com variados factores de influência como podem ser os de natureza histórica (se um factor de risco tem maior preponderância para surgir num país do que em outro, a sua análise será tida como mais gravosa na sua ponderação final), os de natureza de conhecimento

sobre o factor estudado (a atribuição de um valor de risco varia de órgão tutelar para órgão tutelar conforme a análise de sensibilidade que cada órgão atribui ao mesmo risco), etc., sendo que existe alguma liberdade criativa na elaboração de uma matriz de riscos desde que esta sirva o seu propósito de forma clara e simples.

Sendo que o propósito de uma matriz de riscos é a identificação de classes de risco, este factor surge de acordo com a introdução de uma escala de riscos por classes e, para uma melhor identificação a nível visual, de atribuição de cores a cada uma destas classes, resultando genericamente que esta gradação de cores reportará para os níveis de alerta atribuídos a cada uma das actividades (Figura 11).

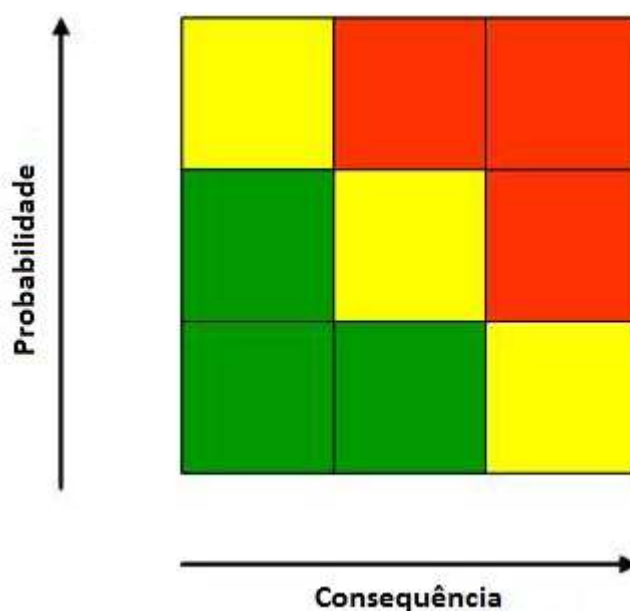


Figura nº 11 - - Exemplo de matriz de riscos (adaptado de [http://www.riskspectrum.com/en/Services/Risk\\_Analysis/Kvalitative\\_Risk\\_Analysis/](http://www.riskspectrum.com/en/Services/Risk_Analysis/Kvalitative_Risk_Analysis/)).

Para uma melhor percepção da forma como se deve abordar e utilizar uma matriz de riscos, utilizar-se-á um exemplo de matriz aplicada a consequências relacionadas com perdas de vidas, definindo quais os factores preponderantes desta.

Sabendo o propósito a que a matriz se propõe, definem-se os objectos de estudo a implementar na mesma. Para o caso de estudo de perdas de vidas, utilizar-se-á no eixo de abcissas o factor *consequências* e no eixo das ordenadas o factor *probabilidade de ocorrência*. Na utilização de uma matriz 5 X 5, teremos uma divisão de consequências em cinco classes e uma divisão de probabilidades também em cinco classes. As classes de consequências ordenadas por ordem crescente de importância serão *muito baixas*, *baixas*, *moderadas*, *elevadas* e *muito elevadas*. As classes de probabilidade ordenadas por ordem crescente de importância serão *pouco provável*, *baixa*, *moderada*, *elevada* e *muito elevada*. Após esta ordenação, criam-se os grupos de risco que repercutam a informação a estudar. Neste caso utilizaram-se cinco grupos de risco, numerados de 1 a 5, conforme a importância atribuída a estes. Cada uma das células que constam da matriz terá uma ponderação de classe probabilística e classe de consequência única e diferente de todas as outras, contudo diferentes classes probabilísticas e de consequência podem pertencer aos mesmos *grupos de risco* sendo que estes são geralmente atribuídos pelos seus decisores com base em reflexões, debate e enquadramento da matriz em

estudo. Geralmente, a atribuição das classes de risco evolui no sentido crescente de acordo com a probabilidade atribuída e consequências dessa actividade, sendo então que o factor que a primeira classe de riscos terá um nível de probabilidade raro e consequências muito baixas verificando-se então a situação menos preocupante enquanto que a classe de riscos mais gravosa traduzir-se-á naquela que acarreta uma probabilidade muito elevada de acontecer e que origina consequências catastróficas.

Este tipo de análise torna-se preciosa para fundamentar ponderações nos mais variados contextos e permite também ser um instrumento de apoio a intervenção em obras junto dos poderes decisórios. Devido ainda ao seu carácter de aplicabilidade, se os propósitos da matriz forem trabalhados no sentido da sua simplificação, poderá ser um instrumento de medição compreensível junto de vários grupos afectos do propósito do estudo efectuado, traduzindo assim o seu carácter de globalidade de estudo sem necessidade de apreensão de conceitos profundos sobre a temática.

### **2.5.6. Barragens e legislação**

A apreciação de riscos é uma disciplina que carece de outras vertentes para que seja fundamentada. Essas vertentes passam por definições de termos a estudar, enquadramentos de actividades em escalas que possam ser mensuráveis, análise das mesmas em instrumentos concebidos para o propósito da sua validação e, sobretudo, que o resultado desses estudos seja válido perante a realidade da legislação nacional, caso esta exista.

Com este propósito e o da descrição de outros elementos existentes na zona mais sensível do estudo de uma barragem, o vale a jusante, surge a necessidade de um documento que explique a informação atrás referida. Este documento denomina-se como Plano de Emergência de Barragem (PEB), que se divide em Plano de Emergência Interno (PEI) e o Plano de emergência Externo (PEE), sendo que estes têm de obrigatoriamente ser conformes de acordo com a legislação em vigor.

Tendo em conta as dimensões de projecto que uma barragem envolve, existiu a necessidade de criação de órgãos que monitorizem e legislem todos os aspectos relacionados com as fases de estudo, construção, manutenção e abandono/desactivação de barragens.

Pode afirmar-se que existem três tipos de órgãos que tutelam a legislação referente a barragens em Portugal, sendo que cada uma delas tem o seu papel na tutela. São estes:

- Comissão Nacional Portuguesa das Grandes Barragens (CNPGB) – Em termos gerais é a representação portuguesa da *International Commission on Large Dams* (ICOLD), sendo que é designada pelo Ministério do Ambiente e presidida pelo Presidente do Instituto da Água (INAG). Tem como funções a partilha de ideias, conceitos e deliberações aplicadas pelo ICOLD de forma a adaptar-se à realidade nacional;
- Comissão de Segurança de Barragens (CSB) – Actua junto do Conselho Superior de Obras Públicas;



- Comissão de Gestão de Albufeiras (CGA) – Presidida pelo Presidente do INAG e tem como função o estabelecimento de legislação relativa à exploração de albufeiras, com maior incidência em épocas de cheia ou seca.

Já quanto à área de intervenção na segurança em barragens, as entidades intervenientes que avaliam a validade dos processos são as abaixo descritas:

- INAG - Na qualidade de organismo com competência genérica de controlo de segurança das barragens, que se designa por Autoridade Nacional de Segurança de Barragens;
- CSB - Funciona junto da Autoridade Nacional de Segurança de Barragens prestando auxílio em questões de carácter legislativo;
- Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) - Na qualidade de consultor da Autoridade Nacional de Segurança de Barragens em matéria de controlo de segurança das barragens;
- Autoridade Nacional de Protecção Civil (ANPC) - Como entidade orientadora e coordenadora das actividades de protecção civil ao nível nacional;
- Dono de obra - Entidade responsável pela obra perante a Autoridade Nacional de Segurança de Barragens, para efeitos de aplicação do presente Regulamento, em virtude de deter um título jurídico suficiente para construir ou explorar a barragem ou, na ausência daquele título, em virtude da efectiva execução material da obra ou da sua exploração (Decreto-Lei n.º 344/2007 de 15 de Outubro).

Em termos de regulamentação, existem cinco documentos que legislam os aspectos relacionados com barragens em território nacional. São estes:

- Regulamento de Segurança de Barragens (RSB) – DL 11/90, de 6 de Jan. (substituído por DL 344/2007 de 15 de Outubro)
- Regulamento de Pequenas Barragens – DL 409/93, de 14 de Dez.
- Normas de Projecto de Barragens – Portaria 846/93, de 10 de Set.
- Normas de Observação e Inspeção de Barragens - Portaria 847/93, de 10.09.1993 (Substituído por Portaria 246/98, de 21 de Abr.)
- Normas de Construção - Portaria 246/98, de 21.04.1998

À luz da regulamentação de ICOLD, uma grande barragem é aquela que cumpre um dos seguintes factores:

- Barragem de altura igual ou superior a 15m (medida a partir do ponto mais baixo da fundação)
- Barragem de altura entre 10 e 15m, desde que preencha pelo menos uma das seguintes condições:

- Capacidade da albufeira igual ou superior a 1 milhão de metros cúbicos;
- Coroamento com desenvolvimento superior a 500m;
- Caudal de ponta da cheia de dimensionamento igual ou superior a 2000 metros cúbicos por segundo;
- Existência de problemas especiais de fundação;
- Obra de concepção não usual.

A par desta regulamentação, as grandes barragens obedecem sobretudo à regulamentação do RSB desde que cumpram as seguintes condições:

- Altura, medida desde a parte mais baixa da superfície geral da fundação, superior a 15 m;
- Capacidade de albufeira superior a 100.000 m<sup>3</sup>;
- Verificação pela entidade competente para a aprovação do projecto, quando dessa aprovação, da existência de risco potencial elevado ou significativo.

Segundo o DL 344/2007 de 15 de Outubro, as barragens classificam-se, relativamente à sua segurança, de acordo com três classes em função dos danos potenciais associados à onda de inundação correspondente ao cenário de acidente mais desfavorável.

**Quadro 2 - Classificação de barragens de acordo com danos potenciais (de acordo com o RSB).**

CLASSE	APLICAÇÃO
I	Residentes em número igual ou superior a 25.
II	Residentes em número inferior a 25; ou Infra -estruturas e instalações importantes ou bens ambientais de grande valor e dificilmente recuperáveis ou existência de instalações de produção ou de armazenagem de substâncias perigosas.
III	As restantes barragens.

Sendo que os danos serão associados a factores de perdas tanto humanas como materiais.

Ainda relativo à regulamentação de barragens, importa referir, através da figura do RSB, que se “impõe a elaboração de uma carta de riscos representando as zonas inundadas pela onda resultante de uma eventual ruptura de barragem, bem como as alturas de água e os respectivos tempos de chegada. O resultado destes estudos de inundação é comunicado ao Serviço Nacional de Protecção Civil, com carácter reservado (artigo 43) ” (alínea bd), artigo 4º do DECRETO LEI n.º 344/2007 de 15 de Outubro)

## **2.5.7. Plano de Emergência de uma Barragem**

### **2.5.7.1. Introdução**

O planeamento de emergência é competência de área do controlo de risco sendo que se procura apenas fazer um breve enquadramento dos planos de emergência contextualizando a informação necessária à proposta de tese.

O Plano de Emergência de uma Barragem divide-se em dois documentos: O Plano de emergência Interno (PEI) e o Plano de Emergência Externo (PEE) (Art. 46º, n.º 2 do RSB).

### **2.5.7.2. Plano de Emergência Interno (PEI)**

Este documento é responsabilidade do dono de obra da barragem e tem como função a discretização do planeamento tomado para a Zona de Auto-Salvamento (ZAS) “sendo que este é a zona do vale, imediatamente a jusante da barragem, na qual se considera não haver tempo suficiente para uma adequada intervenção dos serviços e agentes de protecção civil em caso de acidente e que é definida pela distância à barragem que corresponde a um tempo de chegada da onda de inundação igual a meia hora, com o mínimo de 5 km” (RSB).

O PEI é então afecto às áreas do corpo de barragem, albufeira e vale a jusante da barragem numa extensão de 17.0 km (no caso de estudo), sendo que, por norma, esta área tem uma extensão mínima de 5 km a partir do corpo de barragem e na qual a onda de inundação demora cerca de 30 minutos a percorrer o vale imediatamente a jusante da barragem (RSB). Neste documento constam as articulações e procedimentos entre os vários elementos competentes da barragem assim como dados referentes à ZAS. Para que a eficácia do mesmo esteja garantida, este documento tem de ser integralmente estruturado com planos de emergência das autoridades precedentes à sua elaboração, estar de acordo com o RSB e ter uma articulação integral com o PEE.

A sua composição compreende uma discretização global do local onde será implantado, quais as características da barragem, qual o seu enquadramento face à legislação, interfaces barragem / local de implantação da mesma, discretização do vale a jusante e elaboração de planos de emergência (com cadeias de comando, contactos de autoridades, formas de procedimento face a uma situação real de aplicação, etc.). Toda esta informação deve ser completada com fotografias ou figuras que ajudem a uma melhor compreensão dos mesmos.

Relativamente à apreciação de riscos, este documento torna-se importante no propósito de clarificar os níveis de acção de risco para uma melhor compreensão. Proceda-se então à descrição dos níveis tendo com base o PEI da barragem de Odelouca (Franca *et al*, 2010 e 2011).

#### Nível 0 (Azul): Nível mínimo de alerta

O Nível de alerta Azul corresponde a uma situação normal de rotina, ou à detecção de pequenas anomalias à gestão corrente que no seu todo não afectam a segurança da barragem. A existência e detecção deste tipo de problemas não pressupõem a existência de consequências para a barragem ou no vale a jusante.

O nível Azul corresponde à detecção de eventos ou anomalias por parte do Técnico Responsável pela Exploração com as seguintes características:

- Incidentes que afectam a funcionalidade mas não a segurança da obra;
- A curto ou médio prazo não colocam em risco a segurança estrutural da barragem, dos seus órgãos operacionais e do sistema de observação;
- Com lenta evolução no tempo;
- Acontecimentos associados a uma probabilidade de acidente negligenciável;
- De fácil resolução pelo Dono de Obra, ou pelo Técnico Responsável pela Exploração sob o controlo do Director do PEI;
- Sem qualquer tipo de consequência nociva no vale a jusante.

Destacam-se as seguintes situações como desencadeadoras do nível de alerta Azul:

- Ocorrência ou possibilidade de ocorrência de condições atmosféricas adversas que requerem acompanhamento das cotas de água na albufeira e que podem induzir à ocorrência de cheias de período de retorno inferiores a 100 anos;
- Detecção de pequenas anomalias tais como deteriorações no corpo ou nos órgãos de segurança da barragem que poderão a prazo afectar a sua segurança estrutural ou no imediato a sua funcionalidade;
- Ocorrência de sismos que induzam acelerações muito baixas (inferiores a 0,10 g) no local da barragem.

#### Nível 1 (Amarelo): vigilância permanente da situação e alerta ao Sistema de Protecção Civil

Ao nível de alerta Amarelo corresponde uma situação em que a barragem ainda se encontra estruturalmente segura embora o incidente detectado continue a desenvolver-se podendo comprometer a segurança estrutural ou operacional da obra ou do seu sistema de observação.

O nível de alerta Amarelo pressupõe a existência de descargas elevadas por gestão operacional ou a detecção de problemas com os elementos operacionais, estruturais, de observação/monitorização da barragem ou com as fundações, ou ainda de outras condições excepcionais que possam pôr em perigo a estabilidade da barragem ou

proporcionar a inundação do vale a jusante, como situações meteorológicas adversas ou ocorrências sísmicas de elevada magnitude.

Nesta fase de alerta são admitidas consequências pouco graves a jusante. A uma situação de nível Amarelo correspondem as seguintes características:

- Embora a segurança estrutural da barragem não esteja em risco, o evento poderá representar uma ameaça à integridade e operacionalidade da estrutura ou do seu sistema de observação;
- A situação evolui claramente no tempo, permitindo no entanto a tomada de decisões com base na avaliação cuidada da situação de emergência;
- Acontecimentos associados a uma baixa probabilidade de acidente;
- Existe a possibilidade da situação se agravar e provocar eventuais danos ou desencadear efeitos perigosos para pessoas e bens no vale a jusante.

Existe no entanto a convicção de que a situação se pode controlar sendo no entanto necessário que o Director do PEI recorra à assistência de agentes externos.

Destacam-se as seguintes situações como desencadeadoras do nível de alerta Amarelo:

- Ocorrência ou possibilidade de ocorrência de condições atmosféricas adversas que induzam cheias com efeitos no vale a jusante (períodos de retorno entre os 100 e os 500 anos);
- Detecção de anomalias no corpo da barragem, nas suas fundações, nos seus órgãos de segurança ou no sistema de observação que obriguem à tomada imediata de medidas correctivas de reparação ou reforço;
- Ocorrência de sismos que induzam acelerações baixas (superiores a 0,10g mas inferiores a 0,15g) no local da barragem;
- Ocorrência de outros eventos que se julguem susceptíveis de colocar em risco a segurança da obra.

#### Nível 2 (Laranja): perigo iminente de ruptura

O nível de alerta Laranja corresponde à ocorrência de cheias com elevado período de retorno, ou à detecção/ evolução de problemas graves, em que se admite não ser possível controlar a situação, e que poderá vir a ter como consequência a ruptura da barragem.

Este nível corresponde a detecção de eventos ou anomalias por parte do responsável pela exploração com as seguintes características:

- A segurança estrutural e operacional da barragem está em risco;
- A situação evolui rapidamente no tempo, não permitindo a tomada de decisões com base numa avaliação demorada da situação de emergência;
- Acontecimentos associados a uma elevada probabilidade de acidente;

- Existe a possibilidade da situação se agravar com consequências graves para pessoas e bens no vale a jusante.

O evento não pode ser controlado sendo necessário que o Director do PEI recorra à intervenção de agentes externos. No nível de alerta Laranja incluem-se as situações com grande probabilidade de originar consequências graves na barragem e no vale a jusante, nomeadamente a iminência de ruptura da obra.

Destacam-se as seguintes situações como desencadeadoras do nível de alerta Laranja:

- Ocorrência de condições atmosféricas e consequente cheia com período de retorno superior a 500 anos ou verificação de cota na albufeira superior a 102,35 m mas inferior a 104,00 m;
- Detecção de anomalias graves no corpo da barragem, nas suas fundações, nos seus órgãos de segurança ou no sistema de observação;
- Ocorrência de sismos que induzam acelerações moderadas (superiores a 0,15g mas inferiores a 0,25g) no local da barragem.
- Ocorrência de outros eventos susceptíveis de levar a barragem à ruptura.

#### Nível 3 (Vermelho): ruptura em processo ou certeza de ruptura iminente

Ao nível de alerta 3 (Vermelho) corresponde uma situação de catástrofe inevitável em que ocorre (visivelmente) ou se prevê com certeza e a curto prazo a ruptura da barragem ou da ocorrência de graves consequências no vale a jusante. A uma situação de nível Vermelho correspondem as seguintes características:

- A estrutura encontra-se em ruptura;
- Situação incontrolável;
- Acontecimentos associados a uma extremamente elevada probabilidade de acidente – catástrofe iminente;
- Situação com consequências graves para pessoas e bens no vale a jusante.

Ainda de salientar que o PEI é obrigatório, segundo o DL n.º 344/2007, de 15 de Outubro, para os tipos de barragem que constam das classes I e II quanto aos seus danos potenciais.

#### **2.5.7.3. Plano de Emergência Externo (PEE)**

Parte integrante do planeamento de emergência de uma barragem, no PEE procura-se a articulação entre os vários elementos afectos ao planeamento de emergência na zona posterior à ZAS.

O planeamento de emergência de uma barragem tem por objectivo a protecção e salvaguarda da população, bens e ambiente, bem como a mitigação das consequências

de um acidente em situações de emergência associadas a ondas de inundação (ponto 1, do artigo 46º, DL n.º 344/2007, de 15 de Outubro).

O PEE é elaborado por autoridades de Protecção Civil sendo articulado com o PEI no caso de existência de uma ruptura de barragem. Os procedimentos devem ser seguidos conforme constam no documento e as autoridades devem ser alertadas para que possam intervir junto da área afectada. Ao contrário da ZAS, neste caso particular e devido ao tempo que demora a chegada da onda de cheia, a população é socorrida pelas autoridades competentes, sendo que existe uma probabilidade muito baixa de existência de perdas de vidas e, comparativamente com a ZAS, as perdas a nível de economia são francamente menos consideráveis.





### 3. Análise de risco na Barragem de Odelouca

#### 3.1. Considerações gerais

##### 3.1.1. Breve caracterização da barragem em estudo

A barragem de Odelouca teve a sua génese num estudo prévio de Aproveitamento Hidráulico das Bacias Hidrográficas do Algarve nos anos 70 do século passado, sendo que avançou para projecto na mesma década. A sua finalização e correspondente inauguração dá-se em 2009 concluindo um projecto que se prolongou durante cerca de quarenta anos.

A barragem de Odelouca insere-se na ribeira de Odelouca, que se localiza no concelho de Monchique, região do Algarve, Portugal. Tem como dependências principais uma ligação através de um túnel ao troço de água Funcho-Alcantarilha anterior à barragem e um centro de reprodução do Lince Ibérico. O objectivo principal da construção desta barragem foi a manutenção de água nesta região, nomeadamente em épocas de seca, sendo que esta é utilizada tanto para regadio ou para consumo humano. De referir ainda que o objectivo de abastecimento desta barragem, considerada até à data a maior da região do Algarve, serve todo o Barlavento Algarvio e, em ligação com a Estação Elevatória Reversível, poderá também ligar-se à rede de abastecimento de águas do Sotavento Algarvio.

Para termos uma breve noção da sua importância, atente-se à Figura 12 e Quadro 3 de forma a poder-se compreender a necessidade de água que esta barragem representa.

#### Necessidades de água para abastecimento público



Figura nº 12 - Abastecimento público de água na região onde a barragem de Odelouca se insere. (<http://aguasdoalgarve.pt/odelouca/index.php/caractart/disponibilidadesnecessidades>)

**Quadro 3 - Volumes de água das albufeiras e aquíferos da região onde a barragem de Odelouca se insere.**  
(<http://aguasdoalgarve.pt/odelouca/index.php/caractart/disponibilidadesnecessidades>)

	Volumes disponibilizados em 2009 [hm <sup>3</sup> ]
Albufeira do Funcho	13,7
Albufeira da Bravura	5,1
Albufeiras de Odeleite-Beliche	38,4
Ribeira de Odelouca	3,7
Aquífero Querença-Silves	12,1
Aquífero de Almádena	37.700 [m <sup>3</sup> ]
<b>TOTAL</b>	<b>73</b>

### 3.1.2. Historial

De forma a acompanhar o desenrolar da obra, segue-se um breve historial para ter uma percepção do andamento do estado de obra ao longo do trajecto estudo inicial – projecto – construção – utilização.

**1934** Decreto-Lei 23.912, onde se reconhece às ribeiras do Arade e Odelouca a “utilidade pública para vários fins” como sejam o abastecimento, a produção de energia eléctrica e a rega

**1973** Elaboração do Estudo Prévio do Aproveitamento Hidráulico das Bacias Hidrográficas do Algarve (Direcção-Geral dos Serviços Hidráulicos)

**1976** Elaboração do primeiro projecto do Túnel Odelouca-Funcho

**1977** Elaboração do primeiro projecto da Barragem de Odelouca e Barragem do Funcho

**1981 | 1987** Construção da Barragem do Funcho

**1996** Primeiro processo de Avaliação de Impacte Ambiental (AIA), sobre a Barragem de Odelouca e o Túnel Odelouca-Funcho, tendo a Comissão de Avaliação proposto a reformulação do Estudo de Impacte Ambiental (EIA)

**1998** Segundo processo de AIA, tendo a Comissão de Avaliação emitido parecer favorável à construção da solução alternativa 3

**2001** Início da construção da Barragem de Odelouca

**2003** Suspensão dos trabalhos de construção da Barragem de Odelouca

**2001 | 2006** Construção do Túnel de Odelouca-Funcho

**2006 | Dez | 22** Passagem do Projecto Odelouca para a *Águas do Algarve, S.A.*

**2007 | Fev | 9** Reinício da construção da Barragem de Odelouca (conclusão prevista: 2010)

**2008 | 2009** Construção do Centro Nacional de Reprodução do Lince Ibérico

**2009 | Jun | 18** Conclusão da construção do aterro da barragem de Odelouca

(in <http://aguasdoalgarve.pt/odelouca/index.php/histart>)

### **3.1.3. Principais características da barragem de Odelouca**

#### **3.1.3.1. Caracterização global**

Conforme se percebeu pela informação atrás explícita, a barragem em estudo é de vital importância para a região onde se insere. A par desta situação, existiu uma forte pressão na área ambiental do projecto da barragem, sendo que se tentou buscar a minimização de impactos ambientais no local onde a barragem se insere tendo como medida principal, para a sua construção, a utilização da larga maioria de materiais resultantes da zona de desmonte serem aplicados na sua construção. A informação que consta deste capítulo foi obtida por análise de projectos e documentação como o PEI referente à barragem.

A barragem é em aterro zonado com núcleo argiloso utilizando, essencialmente, materiais provenientes das manchas de empréstimo da albufeira. O perfil-tipo da barragem apresenta o paramento de montante com inclinações de 1:2,25 (V/H) abaixo da cota 65,0 e 1/2 (V/H) acima desta cota, e o paramento de jusante com inclinações de 1:2,25 (V/H) abaixo da cota 46 e de 1:1,5 (V/H) acima desta cota. Considerando a cota do ponto mais baixo da fundação, a barragem tem uma altura máxima de 76,0 m. Em planta, apresenta um eixo curvilíneo, com um desenvolvimento no coroamento de 418,0 m. A largura do coroamento da barragem é de 11, 0 m. (PEI)

Para uma melhor percepção das características associadas a este tipo de construção, constitui-se o Quadro 4 com o propósito de enquadrar as principais características da barragem de Odelouca.

**Quadro 4 - Características gerais da barragem de Odelouca**  
<http://aguasdoalgarve.pt/odelouca/index.php/caractart/barragem>

Tipo	Aterro zonado com núcleo argiloso
Materiais	Xisto, argila, sienito
Altura	76 m
Coroamento /desenvolvimento)	415 m (11 m de largura)
Volume total da albufeira	157 hm <sup>3</sup>
NPA (nível de pleno armazenamento)	102 m
NMC (nível de máxima cheia)	102,35 m
NME (nível mínimo de exploração)	72 m (Túnel Odelouca – Funcho)
Cota de coroamento	106 m
Talude de montante	1:2 (V:H)
Talude de jusante	1:2,25 (V:H)

Os órgãos de segurança e exploração existentes na barragem de Odelouca são os descarregadores de cheias e a descarga de fundo. O descarregador de cheias (Figuras 13 a 15) é constituído por soleira, três comportas, canal de encosta em salto de ski. O caudal amortecido pela soleira descarregadora é de 1455 m<sup>3</sup>/s para um período de retorno de 5000 anos, sendo de 1140 m<sup>3</sup>/s no caso de apenas uma comporta se encontrar em funcionamento.

A descarga de fundo (Figuras 16 e 17) é independente do corpo da barragem, sendo que a descarga se faz através de um túnel escavado na rocha onde se encontra instalada uma conduta metálica DN 2000 mm, dimensionada para um caudal máximo de 53,9 m<sup>3</sup>/s e permitindo o esvaziamento da albufeira em cerca de 2 a 3 meses.



**Figura nº 13 - Aspecto geral do descarregador de cheias ainda em fase de construção**  
 (<http://aguasdoalgarve.pt/odelouca/index.php/caractart/barragem>)



**Figura nº 14 - Aspecto geral do descarregador de cheia visto do corpo de barragem (Agosto 2011)**



**Figura nº 15 - Vista geral do descarregador de cheias da barragem de Odelouca.**



**Figura nº 16 - Edifício de monitorização da descarga de fundo (visto do corpo de barragem)**





Figura nº 17 - Aspecto geral da descarga de fundo (ainda em construção)  
(<http://aguasdoalgarve.pt/odelouca/index.php/caractart/barragem>)

### 3.1.3.2. Dependências

#### Túnel Odelouca-Funcho

Este túnel foi construído com o propósito de transporte de água da albufeira de Odelouca através do adutor Odelouca-Funcho e deste para o adutor Funcho-Alcantarilha, para que a água transportada seja tratada na estação de tratamento de águas aí existente (ETA de Alcantarilha), tendo como função a distribuição de água potável para o Barlavento algarvio e tem capacidade para abastecimento de água a cerca de 620.000 habitantes. As principais características do túnel são as que constam do Quadro 5.

Quadro 5 - Características gerais do túnel Odelouca-Funcho

Extensão	8,15 km
Diâmetro Interno	2,4 m
Declive Longitudinal	0,012 %
Desnível	1 m
Caudal Máximo	7,8 m <sup>3</sup> /s

Em termos de implantação relacionada com a barragem de Odelouca, a tomada de água do túnel dá-se 2km a montante da barragem de Odelouca e tem como seu término o adutor Funcho-Alcantarilha ligado a este ou então o troço Funcho-Alcantarilha.



Figura nº 18 - – Aspecto geral do edifício de monitorização do túnel Odelouca-Funcho enquadrado na albufeira da barragem de Odelouca (edifício na parte direita da fotografia).

### Açude de São Marcos

A montante do corpo de barragem, junto à povoação de São Marcos, existe um açude construído no âmbito da presente empreitada. Este açude tem como objectivo criar um plano de água junto à povoação quando o regolfo da albufeira de Odelouca se situar abaixo da cota da crista do açude. Tem uma altura máxima de 2,5 m acima do leito, cota de pleno armazenamento de 99,5 e a sua capacidade de armazenamento é incipiente.

#### **3.1.3.3. Ambientais**

Este projecto teve uma forte carga ecológica envolvida e, uma vez que o projecto da barragem de Odelouca afectava áreas do habitat do Lince Ibérico, foi criado um centro de apoio à sua conservação incluído no projecto de barragem. De salientar que este é o centro de conservação com maior incidência e estudo da temática do espécime a nível nacional, desenvolvendo competências junto de outros centros localizados na Península Ibérica.

Ainda se salienta que a área da bacia hidrográfica é habitat da águia de Bonelli, outra espécie em vias de extinção, daí existir atenção para com esta espécie que habita esta região.



#### **3.1.3.4. Arqueologia e património cultural**

Foi encomendado um estudo às entidades competentes sendo que não foi encontrado nenhum achado arqueológico que justificasse uma nova estruturação do plano inicial para a barragem. Assim sendo, pode-se afirmar que este ponto não tem relevância no estudo de projecto da barragem.

### **3.2. Aplicação de apreciação de risco à barragem de Odelouca**

#### **3.2.1. Análise quantitativa**

Como ficou perceptível ao longo deste trabalho, a apreciação de riscos é uma área que envolve capacidade de análise de projecto junto de vários grupos de estudo assim como de regulamentação a aplicar. Devido a este facto, elaborou-se uma metodologia que se pensa ser a mais adequada no procedimento de um trabalho desta natureza.

Anteriormente a se explicar o *modus operandis* do trabalho, importa justificar alguns dos conceitos utilizados no Anexo I do presente trabalho, para uma compreensão facilitada do seu funcionamento. Existem três grandes grupos de identificação de elementos que servem o propósito da tese. São eles a Ocorrência, Contabilização e a Probabilidade associada.

No grupo *Ocorrência* procura-se discriminar as actividades seleccionadas do PEI (cf. Franca *et al*, 2010) para análise (Quadro 6). Foram seleccionadas todas as actividades que envolvem um nível 2 (laranja) de alerta e as actividades de nível 3 (vermelho) de alerta, sendo que foram seleccionadas também actividades de nível 1 (amarelo) para elaborar uma perspectiva de estudo junto da área económica e ambiental na análise quantitativa. No caso de análise do nível 1 não se perspectivam perdas humanas, como tal e tendo em conta o que o instrumento de análise está programado para obtenção de resultados superiores a uma perda humana, não se dá o caso de contabilização de situações com perdas humanas para o nível de alerta amarelo.

Os tipos de ocorrência estudados neste trabalho, assim como as actividades desempenhadas em cada tipo de ocorrência, encontram-se expressos no quadro seguinte:

**Quadro 6 - Tipos de ocorrência e actividades analisadas.**

TIPOS DE OCORRÊNCIA	ACTIVIDADES
Cheias	Ocorrência de cheia de período de retorno superior a 500 anos
	Precipitação sobre a bacia hidrográfica em 20 minutos superior a 50 mm
	Cota na albufeira superior a 102,35 mas nunca superior a 104,00 m
	Subida repentina do nível de água da albufeira
	Cota de Albufeira superior a 104.00m
	Subida Repentina do nível de água da albufeira (taxa superior a 10cm/h) quando o nível de água é superior a 102.35m
Actividade sísmica	Sismo com aceleração na fundação superior a 0.15g e inferior a 0.25g
	Sismo com aceleração na fundação superior a 0.25g
Falha nos órgãos de segurança (descarregador de cheias e descarga de fundo)	Encravamento de uma comporta em época de cheias
	Encravamento de duas comportas fora da época de cheias
	Aparecimento repentino de fendilhação estrutural associada a percolação
	Movimentos diferenciais bruscos detectados
	Redução da capacidade de vazão do descarregador de cheias durante a época de cheias
	Encravamento de duas comportas em época de cheias
	Encravamento de três comportas em qualquer estação do ano
	Obstrução total do descarregador de cheias
	Aparecimento repentino de fendas na estrutura associadas a passagens francas de água através do corpo de barragem

TIPOS DE OCORRÊNCIA (cont.)	ACTIVIDADES (cont.)
Falha estrutural - Transferência de tensões /Fracturação hidráulica	Tensão principal mínima nula
Falha estrutural - Erosão interna	Aumento do caudal drenado acima dos 20 l/s
	Zonas húmidas ou ressurgências no talude de jusante
	Passagens de água francas pelo corpo da barragem
Falha estrutural - Percolação através dos encontros	Aumento substancial da percolação nos encontros
	Aumento brusco para caudais elevados de percolação nos encontros e no maciço jusante
	Passagens de água francas na zona dos encontros
Falha estrutural - Colapso, subsidiência ou fissuração localizada	Deslocamentos bruscos superficiais
Falha estrutural - Instabilidade do corpo de barragem	Aumento brusco da taxa de deslocamento horizontal
	Variação brusca do deslocamento montante/jusante em profundidade
	Deslizamentos significativos nos taludes da barragem
Falha de energia eléctrica (incluindo sistema alternativo)	Falha de energia eléctrica afectando a segurança da barragem fora da época de cheias
	Falha de energia eléctrica afectando a segurança da barragem em época de cheias
Ruptura do açude de S. Marcos	Com nível de água de albufeira superior a 104.00

TIPOS DE OCORRÊNCIA (cont.)	ACTIVIDADES (cont.)
Deslizamento de encostas	Ocorrência nas margens da albufeira com geração de ondas com ocorrência de galgamento (com cota na albufeira inferior a 104.00 m)
	Ocorrência nas margens da albufeira com geração de ondas com ocorrência de galgamento (com cota na albufeira superior a 104.00 m)
Acção criminosa	Afectando a segurança da barragem
	Conducente à inoperacionalidade total dos órgãos de segurança
	Ameaça de bomba
	Conducente à ruptura
	Acto de guerra

No grupo de *Contabilização* procuraram distinguir-se quais os tipos de perdas e como se procedeu à atribuição de um código por actividade com o propósito de distinção de todas as actividades e os danos potenciais que daí advêm, permitindo facilidade na sua identificação posterior em situações de análises.

Quanto aos tipos de perdas, estas podem ser perdas humanas, perdas económicas e perdas ambientais. Estes factores foram os seleccionados para este trabalho uma vez que são as áreas de estudo mais fundamentadas e que melhor servem o propósito da interpretação desta tese. A atribuição de código prende-se com o objectivo de uma rápida identificação de uma actividade, sendo que cada codificação atribuída é única. Para uma melhor clarificação do código atribuído atente-se à expressão seguinte:

AA BB C D

Em que:

- AA corresponde a situações de estudo para: Cheias dos 500 anos (C1), Comportas plenamente abertas com PEI instalado (C2) ou Comportas plenamente abertas sem PEI instalado (C3).
- O valor BB corresponde ao tipo de actividade em estudo. Este valor varia de 01 a 12 conforme o tipo de actividades estudadas. Este valor é o único que evolui

de forma crescente e continuamente, sendo então um bom guia para acompanhar a evolução do quadro que consta do Anexo I.

- C corresponde ao evento estudado. Os eventos variam entre A e I conforme o número de eventos que cada tipo de actividades sobre ela encerra.
- O valor D corresponde aos tipos de perdas preconizados. Os tipos de perdas estudados variam numa escala entre 1 e 3, sendo que 1 é atribuído a perdas humanas, 2 a perdas económicas e 3 a perdas ambientais.

Os danos potenciais exprimem-se em valores de perdas associados ao caso em estudo mediante resultados obtidos através de cálculos. As perdas humanas na ZAS são contabilizadas segundo duas formas: Pessoas na Área de Risco (PAR) e NEV (Número Expectável de Vidas).

O factor PAR é obtido através de trabalho *in situ* de recolha de dados junto dos habitantes que residem na ZAS. Para a barragem de Odelouca foram contabilizadas 112 habitantes permanentes e 90 habitantes flutuantes. Tendo em conta a ponderação utilizada no PEI em que:

$$PAR = Residentes\ permanentes + \frac{1}{3} residentes\ sazonais$$

$$PAR = 112 + \frac{1}{3} \cdot 90 = 142$$

O factor NEV é obtido em função de PAR, sendo que este número deve ser reduzido em metade (Graham, 1999). Assim:

$$NEV = 0.5 \cdot PAR = 0.5 \cdot 142 = 71$$

Foram estes os factores ponderados para os estados de alerta sendo que, para um estado de alerta de nível 1 atribui-se um valor de perdas humanas igual a zero, para um factor de perdas humanas de nível 2 atribuíram-se perdas na ordem das 71 vidas, e para o nível de alerta 3 estimou-se perda total dos indivíduos que residem no vale a jusante, portanto utilizou-se para caracterização deste nível o factor PAR que se estima em 142 vidas perdidas.

A nível económico, estimaram-se três escalas de perdas das quais existem sempre factores constantes como é o caso de perdas de habitação, perdas de terrenos e perdas junto do corpo de barragem. De salientar que nesta ponderação se atribui um valor económico às perdas humanas e perdas ambientais uma vez que estas vêm expressas em unidades diferentes e esta ponderação é sempre tida em conta nos estudos do género.

O primeiro cenário corresponde ao nível de alerta 2 (PEI) e níveis inferiores que tenham sido tidos em conta. Estimou-se um valor de perdas económicas na ordem dos 95M€ tendo em conta os factores contabilizados de forma genérica e considerando-se que não existiram perdas de vidas, portanto não existe ponderação a este nível na atribuição do valor final.

O segundo cenário preconizado envolve uma aceitação de perdas humanas contudo com um PEI instalado e com bom funcionamento deste. Poder-se-á corresponder este cenário a um nível 3 de alerta (PEI) ocorrendo então um cenário de Ruptura. Devido a este facto, estimou-se que existam perdas de vidas humanas na ordem das 72 unidades (NEV) mantendo-se todos os critérios gerais na sua contabilização. O incremento económico dá-se devido a estas perdas humanas sendo que o total de perdas cifra-se em 109 M€.

O terceiro cenário corresponde a uma situação de Ruptura da barragem sem existir qualquer plano de emergência ou acções que promovam informação nesse sentido. Poder-se-á atribuir este cenário a um nível 3 de alerta (PEI) sem PEI instalado. Comparativamente com o segundo cenário preconizado, o incremento de perdas de vidas será na ordem das 71 unidades, totalizando 142 vítimas, sendo então que para contabilização deste cenário se devem juntar as perdas económicas dos cenários gerais e de mais 142 perdas humanas, ascendendo o valor de perda para os 123 M€.

Estes valores foram obtidos de acordo com a tabela que consta do Anexo II, utilizando somatórios de todos os factores ponderados sendo que o único factor que difere nos três casos é o valor económico relacionado com perdas de vidas (0 vidas para o primeiro caso, 71 vidas para o segundo e 142 vidas para o terceiro).

A nível ambiental, a existir uma onda de cheia, a galeria ripícola será afectada. A galeria ripícola é afectada de uma faixa de terreno mínima na ordem dos 5 metros para cada lado, sendo que neste caso se contabilizaram 10 metros para cada lado do rio, totalizando então uma faixa de 20 metros. Foram contabilizados:

$$Área = 20 \cdot 17000 = 340.000 \text{ m}^2 = 34 \text{ Ha}$$

A par da galeria ripícola, são também inundadas áreas florestais, sendo que a área florestal inundável é estimada em 173 Ha. Se se somarem as duas áreas (galeria ripícola e floresta inundada) obtemos o valor de 207 Ha.

Para determinar as possíveis falhas a ocorrer na vida da barragem e para o propósito do trabalho foi utilizado o Plano de Emergência Interno elaborado para a barragem de Odelouca e daí retiraram-se as acções que se consideraram mais pertinentes para o propósito de análise. Não se pretendeu elaborar uma análise exaustiva comum da análise de risco mas apenas utilizar alguns exemplos para compreender a dinâmica da apreciação de riscos. Os exemplos estudados são os exemplos tidos como mais gravosos no PEI uma vez que se enquadram nos níveis de alerta mais elevados do mesmo documento.

De salientar que não foram utilizadas as acções que correspondem ao nível de alerta zero (ou de cor azul) uma vez que estas não constituem ameaça para a integridade da barragem e, por consequente, não se traduzem em perdas de nenhuma natureza estudada. Procedeu-se assim à análise de acções de nível 1 (representadas pela cor

amarela), acções de nível 2 (representadas pela cor laranja) e acções de nível 3 (representadas pela cor vermelha) no PEI.

O nível de alerta 1 (ou amarelo) não constitui uma ameaça significativa à integridade da estrutura contudo foi utilizado no estudo para se visualizar qual o seu papel na interpretação dos resultados da apreciação de riscos. O nível de alerta laranja (ou nível de alerta 2) surge como um intermediário entre um cenário de monitorização da barragem e ameaça real à segurança da barragem, sendo que neste caso existe a possibilidade da barragem entrar em ruptura contudo com “pré-aviso” permitindo a evacuação da população a jusante do vale. O nível de alerta vermelho (nível de alerta 3) pretende demonstrar cenários de ruptura da barragem e suas consequências.

As probabilidades utilizadas neste trabalho são probabilidades sujeitas a discussão e foram obtidas com base no julgamento de engenharia e inerências históricas, sendo que esta pesquisa foi efectuada junto de engenheiros seniores que pronunciaram, de acordo com a sua experiência, os valores que constam do quadro do Anexo I.

As *probabilidades associadas* à ocorrência de um evento foram amplamente debatidas e com base na experiência dos seus inquiridores e bibliografia relacionada com a temática (ICOLD, 1995; ICOLD, 2001), concluíram-se os valores que constam do quadro do Anexo I. As probabilidades de ruptura de barragem foram organizadas mediante três escalas que correspondem aos níveis de alerta estudados que se apresentam no Quadro 7.

A probabilidade de originar ruptura surge como um valor padrão para a situação de NA (nível de alerta) preconizado no estudo. Tendo em conta que para um nível de alerta amarelo dificilmente existirá ruptura da barragem, atribui-se um valor igual a 0.01, para um NA laranja existe alguma possibilidade de ruptura atribuindo-se um valor de probabilidade igual a 0.1 enquanto que num nível de alerta vermelho existirá ruptura, daí a probabilidade associada a este NA ser igual a 1.0.

**Quadro 7 - Classificação de probabilidade de originar ruptura quanto ao tipo de probabilidade, valor atribuído a este e nível de alerta onde se insere.**

	Valor atribuído	Nível de alerta
Expectativa de ruptura muito baixa	0.01	Amarelo (ou nível 1)
Expectativa de ruptura a ter em conta	0.10	Laranja (ou nível 2)
Existência de ruptura	1.00	Vermelho (ou nível 3)

Para a probabilidade usada como probabilidade total (ou associada) utilizou-se uma probabilidade contínua que resulta do produto de uma probabilidade de ocorrência de um evento por uma probabilidade de originar ruptura.

$$P_{total} = P_{ocorrência\ de\ um\ evento} \times P_{originar\ ruptura}$$

A utilização de valores de probabilidades mínimas, médias e máximas deve-se a poder ter uma interpretação mais ampla de determinado fenómeno, sendo o valor médio utilizado como valor âncora e os extremos servem o propósito de análise do alcance que determinada actividade pode desempenhar. Por exemplo, podem existir actividades que se encontrem na zona ALARP nos seus valores médios e mínimos contudo o valor máximo pode alcançar a zona do intolerável. Esta actividade deve então ser alvo de uma ponderação rigorosa devido ao cariz de perigosidade que encerra.

O instrumento de medição de análise quantitativa será a expressão de risco mediante análise de gráficos bi-logarítmicos com limites de aceitabilidade e tolerabilidade (exemplo Figura 19). A razão da escolha de gráficos desta natureza deve-se à distribuição de dados em análise ser extensa e esta é uma solução que apresenta resultados satisfatórios para análise. Estes gráficos desenvolvem-se mediante aplicação de número de perdas com a probabilidade de ocorrência desse fenómeno anualmente. Para se ter uma escala de trabalho, implementaram-se dois limites (aceitabilidade e tolerabilidades) conforme proposta em Baptista, 2009.

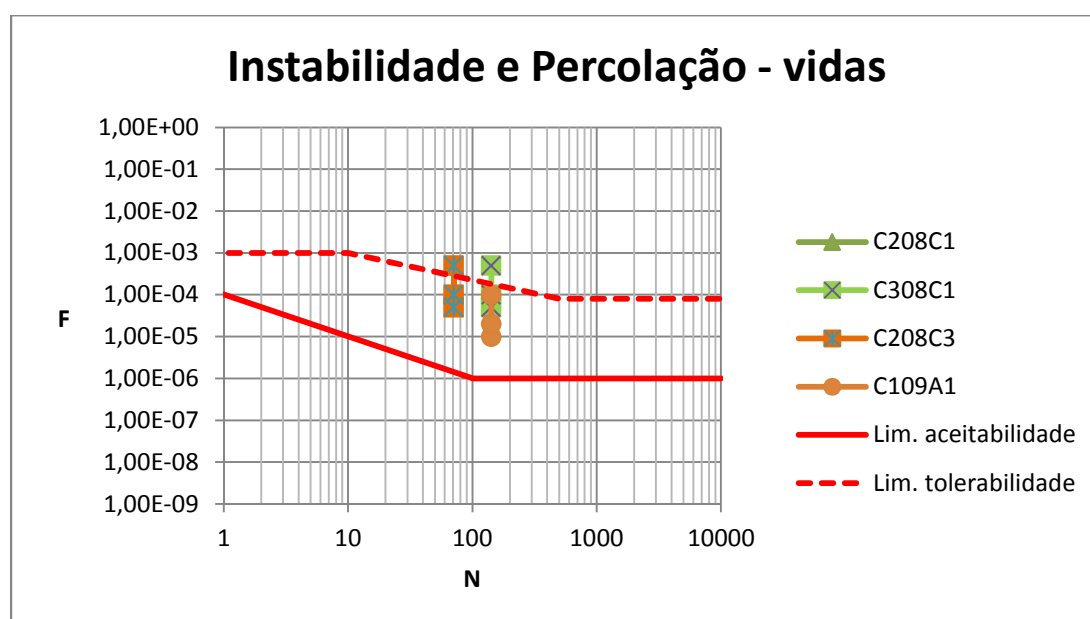


Figura nº 19- Exemplo de aplicação de gráfico bi-logarítmico enquadrado no estudo de perdas de vida numa situação de Falha estrutural - Percolação através dos encontros e Instabilidade do corpo de barragem.

Segue-se um exemplo de aplicação deste tipo de metodologia: Utilização da actividade C206C1, sendo que esta actividade se encontra no domínio de uma situação de comportas plenamente abertas com implementação de PEI relativa ao estudo de perdas de vida numa situação de Falha estrutural - Percolação através dos encontros. O número estimado de perdas médio é de 71 vitimas enquanto que a probabilidade total média



deste factor é 0,0043 %. Apesar de uma probabilidade baixa, este valor encontra-se acima do valor de aceitabilidade e abaixo do de tolerabilidade, logo é um factor que se encontra na região ALARP (Figura 19). Esta deve ser uma actividade acompanhada por especialistas uma vez que o seu máximo, apesar de também ele estar contido na zona ALARP, encontra-se próximo de limite de tolerabilidade, podendo esta actividade pôr em causa o propósito da barragem.

Esta análise baseia-se numa proposta de Baptista, 2009 que tem em consideração alguns estudos efectuados noutros países (ex: Holanda) com conhecimentos mais sólidos nesta temática que o nosso país e na realidade do parque de barragens existentes em Portugal.

### 3.2.2. Análise qualitativa ou semi-quantitativa de apreciação de riscos

A análise qualitativa da apreciação de riscos é feita mediante a análise de uma matriz de riscos proposta em Baptista (2009) tendo em conta outras matrizes de risco elaboradas para o efeito de análise de risco de barragens. De ressaltar que esta matriz é uma tentativa de adaptação à realidade do parque de barragens português.

A matriz em análise compreende as dimensões de cinco classes de consequências para cinco classes de probabilidades. De observar que existem seis tipos de classes de enquadramento do risco.

Atente-se aos Quadros 8 e 9 para uma melhor compreensão

**Quadro 8 - Significado das classes de probabilidades (Baptista, 2009).**

CLASSES		PROBABILIDADE ANUAL ASSOCIADA	OBSERVAÇÕES
5	Muito elevada	>5 %	Ocorrências registadas regularmente. Pode ocorrer uma vez em cada 20 ou menos anos.
4	Elevada	1% – 5%	Ocorrências registadas com alguma regularidade. Pode ocorrer uma vez em cada 20 a 100 anos.
3	Moderada	0,2% - 1%	Poucas ocorrências registadas. Pode ocorrer uma vez em cada 100 a 500 anos.
2	Pouco provável	0.02% - 0.2%	Não é expectável que ocorra e/ou sem ocorrências registadas. Pode ocorrer uma vez em cada 500 a 5000 anos.
1	Rara	<0.02%	Pode ocorrer em circunstâncias muito excepcionais, uma vez em cada 5000 ou mais anos.

Quadro 9 - Significado das classes de consequências (Baptista, 2009).

CLASSES		CATEGORIAS	OBSERVAÇÕES
6	Catastróficas	Pessoas	Estimativa de mais de 500 fatalidades
		Estruturas, infraestruturas e serviços	Afectação por longo prazo de serviços vitais, cidades de grande dimensão e infraestrutura muito perigosa.
		Ambientais	Impactos ambientais muito importantes, irreversíveis
5	Muito Elevadas	Pessoas	Centenas de fatalidades (100 a 500) ou número significativo de fatalidades, afectando grupos específicos que despertem particular pesar (ex. crianças). Número importante de desalojados e por períodos longos
		Estruturas, infraestruturas e serviços	Cidades. Serviços vitais em situações de emergência (hospitais, bombeiros, etc.). Linhas ferroviárias de alta velocidade. Auto-estradas. Perímetros industriais importantes. Redes nacionais de abastecimento. Áreas recreativas de grande utilização (estádios, pavilhões desportivos de grande afluência). Afectação da barragem (ex: barragens de abastecimento público a aglomerados populacionais de grande dimensão)
		Ambientais	Afectação de habitats protegidos e/ou por períodos importantes. Contaminação dos recursos hídricos por períodos importantes.

CLASSES (cont.)		CATEGORIAS (cont.)	OBSERVAÇÕES (cont.)
4	Elevadas	Pessoas	Número significativo de pessoas afectadas, com diversas fatalidades (50 a 100)), número de feridos hospitalizados importante. Número significativo de desalojados.
		Estruturas, infraestruturas e serviços	Aglomerados habitacionais de média a grande dimensão. Agricultura intensa. Indústria e/ou serviços importantes. Itinerários Principais e linhas ferroviárias principais. Afectação da barragem (ex: Barragem hidroagrícola de importância nacional, barragem de abastecimento público a aglomerados populacionais de dimensão moderada, barragens hidroeléctricas de grande produção).
		Ambientais	Impactos negativos significativos com efeitos a médio / longo prazo.
3	Moderadas	Pessoas	Número de fatalidades entre 10 e 50. Alguns feridos hospitalizados ou necessitando de tratamento médico. Desalojados esporádicos.
		Estruturas, infraestruturas e serviços	Aglomerados habitacionais de pequena a média dimensão. Áreas agricultadas. Alguma Indústria e/ou Serviços. Estradas Nacionais, Itinerários Complementares e linhas férreas secundárias. Áreas recreativas sazonais. Afectação de barragem (ex. barragem hidroagrícola de importância regional, barragem de abastecimento público a aglomerados populacionais de pequena dimensão, barragens hidroeléctricas de produção moderada).
		Ambientais	Impactos negativos moderados com efeitos no curto prazo ou impactos reduzidos com efeitos a longo prazo.
2	Baixas	Pessoas	Número de fatalidades inferior a 10. Reduzido número de feridos hospitalizados. Inexistência de desalojados.
		Estruturas, infraestruturas e serviços	Casas dispersas. Áreas de pastagem. Caminhos e estradas municipais. Indústria artesanal. Redes locais de abastecimento. Afectação da barragem (ex. barragens hidroagrícolas de importância local).
		Ambientais	Impactos negativos reduzidos de fácil e rápida recuperação.

CLASSES (cont.)		CATEGORIAS (cont.)	OBSERVAÇÕES (cont.)
1	Muito Baixas	Pessoas	Inexistência de fatalidades. Reduzido número de feridos ligeiros.
		Estruturas, infraestruturas e serviços	Inexistência de habitações. Inexistência de vias de comunicação, de áreas industriais e de serviço ou redes de abastecimento (água, gás, electricidade). Afectação de barragem (ex: barragens privadas, rega de áreas beneficiadas reduzidas, etc.).
		Ambientais	Sem impactos negativos ou com impactos negativos reduzidos.

Apesar de se ter dito que se consideravam cinco situações para as classes de consequências, a autora da proposta considera ainda uma sexta situação que se expressa por ser a situação de catástrofe. Esta medida surge como forma de distinção, na matriz de riscos, de uma classe de risco muito elevada de outra em que o impacto é superior a este, a classe de riscos catastróficos, uma vez que as formas de actuação nestes dois casos são diferentes. Esta forma diferenciada é assinalada com outra cor.

As perdas de vidas enquadram-se no quadro atribuído a “Pessoas” sendo então que as perdas de vida iguais a zero constam do nível 1 (Muito baixas) devido à inexistência de fatalidades. As perdas na ordem das 71 vitimas serão classificada no nível 4 (ou elevado). As perdas na ordem das 142 vitimas classificar-se-ão no nível 5 (ou muito elevado).

Quanto à economia, expressa-se neste tipo de análise mediante enquadramento na classificação de “Estruturas, infraestruturas e serviços”, sendo que para uma ocasião de perdas económicas na ordem dos 95 M€ considerar-se-á um enquadramento na classe 4 (ou elevada) enquanto que perdas económicas na ordem dos 109 M€ e 123 M€ são enquadradas numa classe de perdas de nível 5 (ou muito elevada).

As perdas ambientais, uma vez que são constantes, classificam-se como nível moderado (ou nível 3).

Todos estes valores e respectivos enquadramentos foram debatidos com engenheiros seniores que confirmaram a validade dos mesmos.

A classificação de riscos, na sua proposta original, é numerada de 1 a 6 sendo que a classe 1 corresponde à classe de risco “muito baixo” e o número 6 à classe de risco “intolerável”. Uma vez que as classes de consequências e classe de probabilidade de ocorrências serem numeradas de 1 a 5, com o propósito de distinção do elemento conclusivo dos outros elementos, substitui-se então a numeração original por uma classificação de A a F.

A materialização das classes expressas nos quadros anteriores resultará numa matriz de dimensões 5x5 com cinco classes de consequências, cinco classes de probabilidade de

ocorrência e seis classes de classificação de risco. A matriz de risco resultante é a que consta da figura nº 20.

**Quadro 10 - Classes de risco e medidas associadas (adaptado de Baptista, 2009).**

CLASSES DE RISCO	DESCRIÇÃO	MEDIDAS/OBSERVAÇÕES
F	Intolerável	Associado a consequências moderadas em conjunto com uma probabilidade anula de Ruptura superior a 5%, a consequências elevadas em conjunto com uma probabilidade anula de Ruptura superior a 1%, a consequências muito elevadas em conjunto com uma probabilidade anula de Ruptura superior a 0.2% ou a consequências catastróficas, independentemente da probabilidade de Ruptura. Implementação de medidas imediatas de mitigação e de condicionamentos à exploração e intervenção da autoridade. Realização de estudos técnico- económicos de medidas de mitigação dos riscos a implementar no muito curto prazo.
E	Muito elevado	Implementação imediata de medidas estruturais ou não estruturais para mitigação dos riscos. Possível condicionamento da exploração. Estudos de pormenor para avaliação das medidas de mitigação dos riscos a implementar no curto prazo.
D	Elevado	Reforço das acções de observação e de controlo. Implementação obrigatória de medidas de mitigação dos riscos no curto-médio prazo. Estudos ou ensaios para avaliação das situações e pormenorização das intervenções.
C	Moderado	Reforço das acções de observação e de controlo. Estudos ou ensaios para validação das situações de pormenorização de intervenções obrigatórias no médio prazo.
B	Baixo	Eventual reforço das acções de observação e de controlo. Eventual implementação de medidas de mitigação dos riscos.
A	Muito baixo	Não requer, em princípio, alterações aos procedimentos, designadamente de avaliação periódica do desempenho e/ou da exploração.

A análise da matriz processa-se mediante o enquadramento de uma actividade nos grupos expressos nos quadros 8 e 9. Com este enquadramento e visualizando a matriz proposta, esta actividade intersectará uma classe de risco (constante do quadro 10) sendo esta a classe de risco que servirá o propósito da actividade e devendo-se reger a sua actividade pelo enquadramento proposto.

A título de exemplo, a actividade C203F1, que corresponde a Falha nos órgãos de Segurança – Encravamento de duas comportas em plena época de cheias – Perdas relacionadas com vidas humanas, tem uma probabilidade média associada igual a 0,2 % e danos potenciais na ordem das 71 vítimas humanas no caso de ocorrer. Enquadra-se então na classe de probabilidade de ocorrência de nível 3 (probabilidade de ocorrência moderada) e na escala de consequências enquadra-se no nível das consequências com prejuízos elevados (nível 4). Observando a matriz de risco, esta actividade corresponderá a um nível de risco E, ou seja, um nível de risco muito elevado. Para este nível de risco devem ser implementadas as medidas/observações relacionadas com este tipo de risco: *“Implementação imediata de medidas estruturais ou não estruturais para mitigação dos riscos. Possível condicionamento da exploração. Estudos de pormenor para avaliação das medidas de mitigação dos riscos a implementar no curto prazo.”* Sendo esta informação extraída do Quadro 10.

A análise qualitativa procede-se então para todos os tipos de actividades inventariados no PEI, que contam do Quadro 6, sendo que se analisará o seu conteúdo na discussão de resultados.

PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA	Muito elevada (5)	D	E	F	F	F
	Elevada (4)	C	D	E	F	F
	Moderada (3)	B	C	D	E	F
	Pouco provável (2)	A	B	C	D	E
	Rara (1)	A	A	B	C	D
		Muito Baixas (1)	Baixas (2)	Moderadas (3)	Elevadas (4)	Muito Elevadas (5)
		CONSEQUÊNCIAS				

Figura nº 20 - Representação da matriz de risco proposta para realização do trabalho de apreciação de risco (adaptado de Baptista, 2009).

### 3.3. Discussão de resultados

#### 3.3.1. Introdução

Neste capítulo pretende-se uma análise pormenorizada ao trabalho efectuado. Compreenderá dois grupos de debate de resultados: um grupo de análise quantitativa e outro grupo de análise qualitativa.

#### 3.3.2. Análise quantitativa

A análise quantitativa deste trabalho foi baseada na análise de gráficos bi-logarítmicos que integram a análise de limites propostos por Baptista (2009), mediante factores de perdas de vidas e perdas económicas. Uma vez que este tipo de análise se inicia, na vertente de perdas, num valor inteiro, o factor de perdas quando nulo não é passível de estudo uma vez que não se enquadra no propósito último de ponderação, o que se traduz numa não aplicação gráfica do mesmo.

Os factores de perda de vidas são aqueles que se relacionam directamente com o número de vítimas esperados com a probabilidade que lhes é afectada.

Quanto aos factores de perda económica, não se conseguiu abordar esta temática de uma forma directa de escalonização deste factor, sendo que a abordagem mais próxima que se conseguiu obter foi a de conversão dos valores economicamente estipulados (95 M€, 109 M€ e 123 M€) em factores de vidas humanas mediante a aplicação da equação abaixo, tendo em conta que o valor atribuído para a perda de uma vida humana se cifra em 200 m€ (segundo informação obtida junto de uma seguradora a operar em território nacional).

$$N' = \frac{\text{valor econonómico afectado}}{\text{valor de perda atribuído por pessoa}}$$

Em que  $N'$  é a representação do factor de vida equivalente (à vertente económica). Apesar de não se obterem os valores económicos directos, esta aplicação não deixa de ser válida uma vez que empresta um carácter comparativo com o factor de vida  $N$  e deixa transparecer uma abordagem superficial dos pesos que as actividades económicas desempenham neste tipo de análise.

Os valores obtidos para  $N'$  são então:

$$N' = \frac{95000000}{200000} = 475$$

$$N' = \frac{109000000}{200000} = 545$$

$$N' = \frac{123000000}{200000} = 615$$

Os factores ambientais não foram tidos em conta neste trabalho uma vez que não se encontrou, na bibliografia da especialidade, uma abordagem de análise suficientemente consistente para utilizar este factor como comparativo. Nem uma redução a outro factor, como utilizada para o termo da economia, foi possível devido ao carácter de complexidade que essa questão traria. Esta é, das três áreas a estudo, a menos explorada devido ao carácter de nova abordagem que lhe é imputado, logo ainda não existem estudos suficientes que lhe fundamentem uma abordagem sólida e reconhecida. A título de notificação foram consultadas as obras que constam da bibliografia Rolf e Eknes (1997) e DSC (2007) contudo não se verificaram como práticas para o propósito de análise.

Relativamente ao instrumento proposto para o trabalho, segue-se uma figura (Figura 21) que procura ilustrar uma expressão geral de análise deste tipo de avaliação. Uma vez que não se procede à análise ambiental e a análise económica se relaciona directamente com as perdas de vida, os limites utilizados são os mesmos para análises de perdas de vida e perdas economicamente equivalentes.

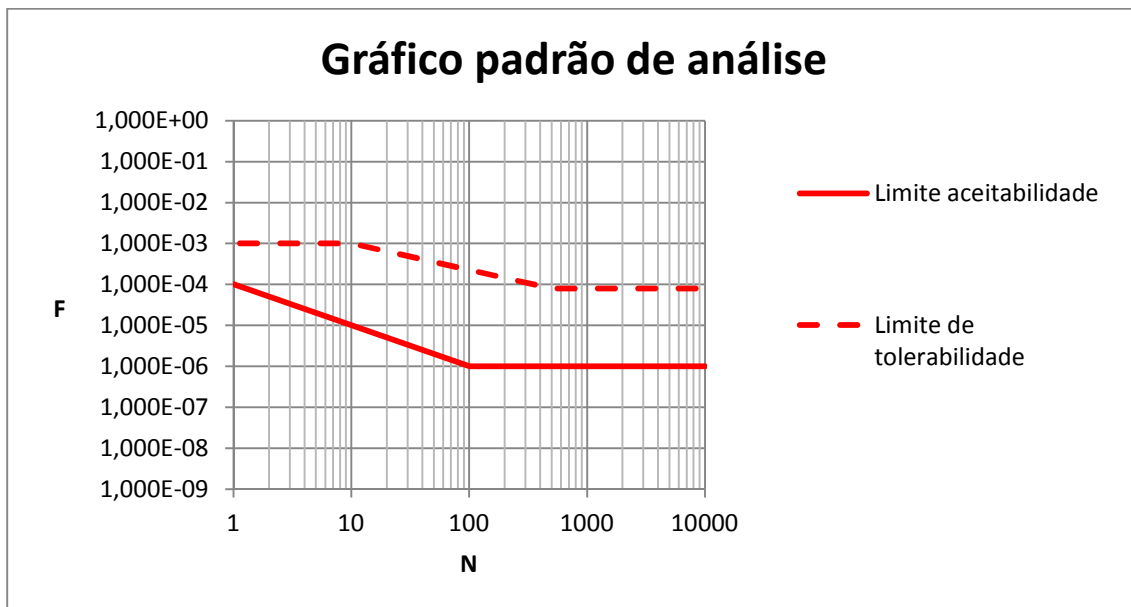


Figura nº 21 - Gráfico padrão utilizado como instrumento de avaliação contendo os limites em estudo.

Em termos de perdas de vidas e observando os gráficos que constam do Anexo III, observa-se que a maioria das actividades se desenrola, no seu plano médio, na região da



zona ALARP portanto estas são passíveis de análise quanto aos eventuais danos que possam causar pondo em risco os habitantes do vale de jusante.

Uma ressalva deve ser tida para com o fenómeno de falência dos órgãos de barragem uma vez que algumas das suas actividades tendem a localizar-se na zona do intolerável. As actividades em causa são C203F1 (Encravamento de duas comportas em época de cheias), C303H1 (Obstrução total do descarregador de cheias) e C303G1 (Encravamento de três comportas em qualquer estação do ano), sendo que estas devem ser alvo de particular atenção na fase de exploração da obra. De salientar ainda que das restantes actividades deste fenómeno, todas tendem a ultrapassar o limite de tolerabilidade no seu valor probabilístico máximo, tornando-se este tipo de actividades o propósito de uma monitorização constante por parte do responsável de barragens.

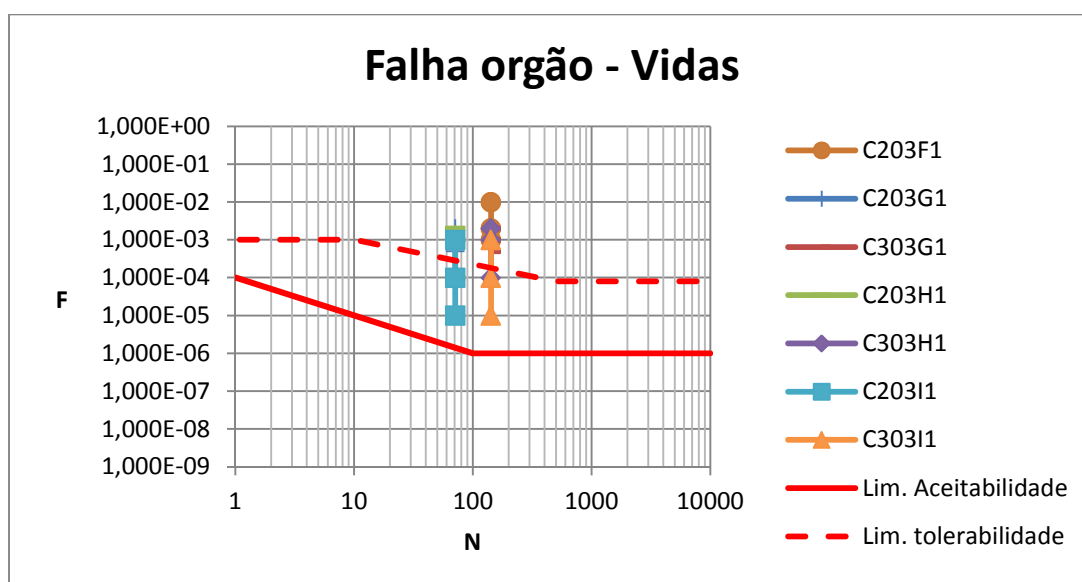


Figura nº 22 - Gráfico bi-logaritmico de relação entre a actividade Falhas de órgãos de descarga e o número de perdas de vida.

Quanto à instabilidade do corpo de barragem, os valores probabilísticos máximo a eles atribuídos surgem na região de intolerabilidade mas os restantes valores atribuídos a estes encontram-se na região ALARP, portanto esta actividade deve ser tida em conta na ponderação final do tipo de actividades a desempenhar.

As actividades que não se enquadram na região ALARP são as actividades pertencentes ao estudo da ruptura do açude de S. Marcos (Figura 23) e do deslizamento de encostas (Figura 24), sendo que estas se pontificam na região de aceitabilidade do gráfico de análise. Devido a este facto, este tipo de análises tendem a ser aceites sem grande problemática nas actividades de desempenho da barragem uma vez que os seus valores médios se excluem da zona de ponderação ALARP. A ter presente que os limites máximos estabelecidos para as actividades que envolvem os deslizamentos de terras se

encontram na região ALARP portanto requerem de observação e ponderação consistentes junto do grupo de análise.

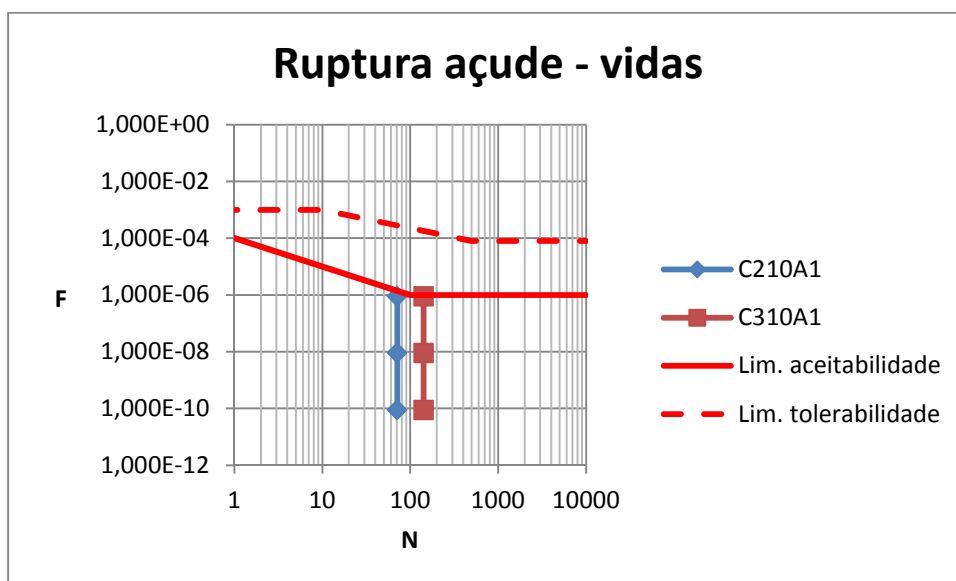


Figura nº 23 - Gráfico bi-logarítmico de relação Ruptura de açude de S. Marcos e o número de perdas de vida.

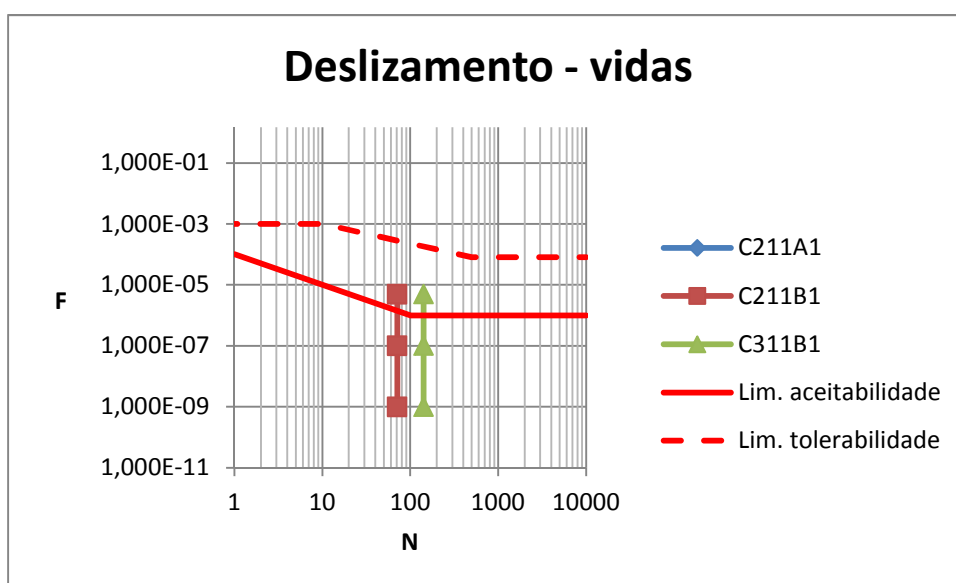


Figura nº 24 - Gráfico bi-logarítmico de relação Deslizamento de encostas e o número de perdas de vida.

Outro tipo de actividades que não consta desta região são aquelas que envolvem sismos, estando estas localizadas na zona de intolerabilidade, em todas as suas hipóteses probabilísticas. Este tipo de acção, expressa na Figura 25, deve ser então revisto por forma a representarem um factor de perigo menos gravoso. A revisão pode proceder-se por análise do dimensionamento da barragem quanto ao estudo dos ensaios sísmicos incrementando dispositivos no corpo de barragem que permitam maior segurança com o eventual surgimento de um fenómeno desta natureza.

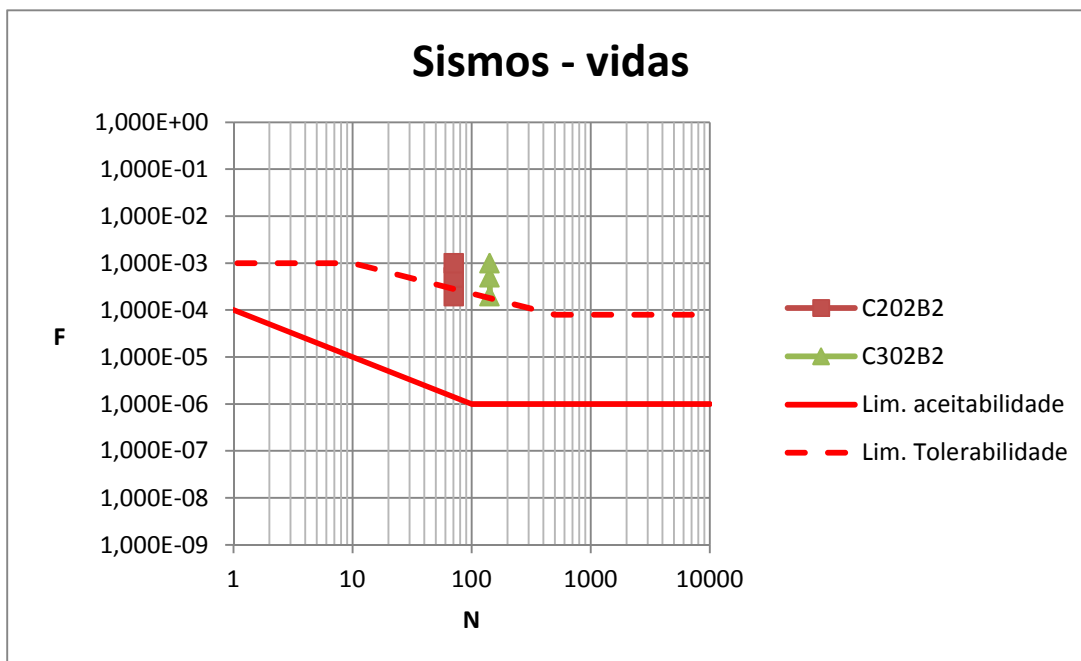


Figura nº 25 - Gráfico bi-logarítmico de relação entre a actividade Sismos e o número de perdas de vida.

Devido ao facto de apresentarem resultados na ordem das zero perdas humanas, as actividades relacionadas com cheias C101A1, C101B1, C101C1, sismos C202A1, falhas nos órgãos de segurança C203A1, C203B1, C203C1, C203D1, C203E1, falha estrutural - transferência de tensões / fracturação hidráulica C204A1, falha estrutural - erosão interna C205A1, C205B1, falha estrutural - percolação através dos encontros C206A1, C206B1, falha estrutural - colapso, subsidiência ou fissuração localizada C207A1, falha estrutural - instabilidade do corpo de barragem C208A1, C208B1, falha de energia eléctrica (incluindo sistema alternativo) C209A1, C209B1, deslizamento de encostas C211A1 e acção criminosa C212A1, C212B1, não vêm consideradas no estudo quantitativo, não existindo portanto análise gráfica destas componentes devido aos limites impostos nos instrumentos utilizados, sendo que teoricamente se localizam na zona de aceitabilidade (em termos de vidas perdidas).

Quanto aos tipos de perdas económicos equivalentes, analisando os gráficos do anexo III, retira-se como informação útil que as actividades relacionadas com a ruptura do açude de S. Marcos e o deslizamento de terras (excepção feita à actividade C211A2 - Ocorrência nas margens da albufeira com geração de ondas com ocorrência de galgamento (com cota na albufeira inferior a 104.00 m)) se pontificam por estarem contidas nos limites de aceitabilidade na sua expressão média. Todos os outros valores se encontram em limites de intolerabilidade. Este facto pode dever-se à má calibração de resultados realizada neste tipo de estudo.

### 3.3.3. Análise qualitativa

Conforme descrito anteriormente, a análise qualitativa passa por enquadrar as actividades propostas a estudo numa matriz de risco com todas as suas classes previamente definidas. Neste caso de estudo, apenas se representa o caso de actividades elaboradas num plano médio (e não mínimo e máximo) uma vez que a variação de valores não era significativa de confronto entre as abordagens. Não serão analisadas todas as actividades individualmente uma vez que este tipo de análise é mais efectiva quando analisada em classes de risco. Destas vamos apenas destacar aquelas actividades e/ou grupos que se achem relevantes para a ponderação da análise qualitativa em causa.

#### Perdas humanas

A matriz de risco obtida relativamente a perdas de vidas, para uma situação de probabilidade média é a representada na figura 26. Conforme se pode verificar, esta análise de tipo de probabilidade e perdas abarca todas as classes de risco propostas neste trabalho.

Deve-se incidir particular atenção para o caso de a actividade C303F1 (Falha nos órgãos de segurança (descarregador de cheias e descarga de fundo) - encravamento de duas comportas em época de cheias, comportas plenamente abertas sem PEI instalado) ser a única actividade mencionada na classe F (intolerável) da escala de classes de risco. É então a actividade que, em termos de perdas de vidas humanas e à luz da análise qualitativa em causa, requer maior atenção sendo que é passível de uma maior monitorização por parte dos projectistas e manutenção por parte do proprietário de barragem. As acções a implementar podem ser de revisão, com regularidade, do software e sistemas manuais que permitam a esta acção ser bem desencadeada, manutenção e monitorização das comportas em causa uma vez que podem não funcionar correctamente devido à acumulação de detritos, etc., sob a penalização de um funcionamento deficiente se traduzir num grande número de perdas de vidas no vale a jusante da barragem.

Outras actividades a ter em conta são aquelas que se enquadram na classe E (risco muito elevado) uma vez que estas apresentam um potencial de perdas de vidas considerável. As actividades em estudo, conforme se pode observar da matriz, são C203F1, C301F1, C302B1, C303G1 e C303H1. As actividades enquadram-se todas no nível de alerta vermelho (3) e variam entre cheias, sismos, obstrução de comportas e obstrução do descarregador de cheias. De salientar que todas as actividades enquadradas neste tipo de classe não possuem PEI, sendo que a única que tem PEI é a actividade que consta da classe F contudo com PEI instalado. Este tipo de actividades deve assim ser monitorizado com muita regularidade sob pena de produzir perdas humanas significativas.

Os grupos de falhas estruturais são o grupo de actividades que menos pesam na decisão de construção de uma barragem com estas especificidades uma vez que apresenta

valores que variam entre as classes de risco A e C, sendo que estes requerem acompanhamento mas não com a frequência dos grupos E e F. A par deste grupo, o que menor representação ao que o número de perdas de vida concerne será a falha de energia, sendo que a actividade se enquadrará na classe de risco A, não se esperando nenhuma vítima devido a este evento. Um resumo das actividades está patente no Quadro 11.

PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA	Muito elevada (5)					
	Elevada (4)					
	Moderada (3)	C203A1, C205B1			C203F1	C303F1
	Pouco provável (2)	C101A1, C101B1, C101C1, C203C1, C203D1, C203E1, C206B1, C209B1			C201F1, C202B1, C203G1, C203H1	C301F1, C302B1, C303G1, C303H1
	Rara (1)	C101D1, C202A1, C203B1, C204A1, C205A1, C206A1, C207A1, C208A1, C208B1, C209A1, C211A1, C212A1			C201E1, C203I1, C205C1, C206C1, C208C1, C210A1, C211B1, C212C1, C212D1, C212E1	C301E1, C303I1, C305C1, C306C1, C308C1, C310A1, C311B1, C312C1, C312D1, C312E1
Média, vidas		Muito Baixas (1)	Baixas (2)	Moderadas (3)	Elevadas (4)	Muito Elevadas (5)
		CONSEQUÊNCIAS				

Figura nº 26 - Representação da matriz de risco com probabilidade média relativamente a perdas de vidas.

**Quadro 11 - Enquadramento de actividades em termos de vidas conforme classe de risco.**

CLASSES DE RISCO	DESCRIÇÃO	ACTIVIDADES
<b>F</b>	<b>Intolerável</b>	<b>C303F1</b>
E	Muito Elevado	C203F1, C301F1, C302B1, C303G1, C303H1
D	Elevado	C201F1, C202B1, C203G1, C203H1, C301E1, C303I1, C305C1, C306C1, C308C1, C310A1, C311B1, C312C1, C312D1, C312E1
C	Moderado	C201E1, C203I1, C205C1, C206C1, C208C1, C210A1, C211B1, C212C1, C212D1, C212E1
B	Baixo	C203A1, C205B1
A	Muito baixo	C101A1, C101B1, C101C1, C203C1, C203D1, C203E1, C206B1, C209B1, C101D1, C202A1, C203B1, C204A1, C205A1, C206A1, C207A1, C208A1, C208B1, C209A1, C211A1, C212A1

### Perdas económicas

As perdas económicas traduzem-se na Figura 27. Após consulta da matriz, detectaram-se como elementos que requerem intervenção imediata as actividades C203F2 (Falha nos órgãos de segurança (descarregador de cheias e descarga de fundo) - Encravamento de duas comportas em época de cheias, comportas plenamente abertas sem PEI instalado) e C303F2 (Falha nos órgãos de segurança (descarregador de cheias e descarga de fundo) - Encravamento de duas comportas em época de cheias, comportas plenamente abertas com PEI instalado). Estas são as únicas actividades que se enquadram, na perspectiva da análise de matriz de risco proposta e estudando as componentes económicas, na classe de risco F.

Os factores de risco que se enquadram na classe de risco D são, neste caso, os menos graves. A maioria destas actividades são da ordem de falhas estruturais contudo, e quando comparado com a análise qualitativa de perdas humanas, têm maior preponderância para que o seu risco associado seja mais elevado do que os valores de risco de perdas humanas tendem a experimentar na transição para outra classe de risco.

De salientar que as actividades associadas ao tipo de ocorrência acções criminosas se enquadram todas na classe D de riscos, o que é um valor intermédio na análise verificada para esta situação de economia. Apesar do seu carácter de grandes perdas, as probabilidades associadas a este tipo de actividades são sempre de pouca expressão,

limitando a ocorrência do mesmo fenómeno. Um resumo das actividades está patente no Quadro 12.

PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA	Muito elevada (5)					
	Elevada (4)					
	Moderada (3)				C203A2, C205B2	C203F2, C303F2
	Pouco provável (2)				C101A2, C101B2, C101C2, C101D2, C203C2, C203D2, C203E2, C206B2, C209B2	C201F1, C302F2, C203G2, C303G2, C203H2, C303H2
	Rara (1)				C202A2, C203B2, C204A2, C205A2, C206A2, C207A2, C208A2, C208B2, C209A2, C211A2, C212A2, C212B2	C201E2, C301E2, C202B2, C302B2, C203I2, C303I2, C205C2, C305C2, C206C2, C306C2, C208C2, C308C2, C210A2, C310A2, C211B2, C311B2, C212C2, C312C2, C212D2, C312D2, C212E2, C312E2
Média, Eco		Muito Baixas (1)	Baixas (2)	Moderadas (3)	Elevadas (4)	Muito Elevadas (5)
		CONSEQUÊNCIAS				

Figura nº 27 - Representação da matriz de risco com probabilidade média relativamente a perdas económicas.

**Quadro 12 - Enquadramento de actividades económicas conforme classe de risco.**

CLASSES DE RISCO	DESCRIÇÃO	ACTIVIDADES
<b>F</b>	<b>Intolerável</b>	<b>C203F2, C303F2</b>
E	Muito Elevado	C203A2, C205B2, C201F1, C302F2, C203G2, C303G2, C203H2, C303H2
D	Elevado	C202A2, C203B2, C204A2, C205A2, C206A2, C207A2, C208A2, C208B2, C209A2, C211A2, C212A2, C212B2
C	Moderado	Sem valores atribuídos
B	Baixo	Sem valores atribuídos
A	Muito baixo	Sem valores atribuídos

### Perdas ambientais

As perdas ambientais, devidas à sua redução a uma classe de ocorrência de probabilidades, materializam-se mediante três classes de risco, sendo que a menos gravosa é a classe de risco B e a mais gravosa das classes de risco para este tipo de análise é a classe D. A sua representação é expressa na Figura 28.

Os factores de maior preocupação no que concerne a este tipo de perdas são os factores C203A3 (Falha nos órgãos de segurança (descarregador de cheias e descarga de fundo) - Encravamento de uma comporta em época de cheias) e C205B3 (Falha estrutural - Erosão interna - Zonas húmidas ou ressurgências no talude de jusante). Estes valores justificam-se com a forte probabilidade de ocorrência destes fenómenos comparativamente com outros.

De observar a quantidade de actividades que se enquadram em níveis menos preocupantes na sua relação com perdas ambientais, como é o caso observado na classe de risco C. Um resumo das actividades está patente no Quadro 13.



PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA	Muito elevada (5)					
	Elevada (4)					
	Moderada (3)			C203A3, C205B3		
	Pouco provável (2)			C101A3, C101B3, C101C3, C201F3, C202B3, C202C3, C202D3, C202E3, C202F3, C202G3, C202H3, C206B3, C209B3		
	Rara (1)			C101D3, C201E3, C202A3, C203B3, C203I3, C204A3, C205A3, C205C3, C206A3, C206C3, C207A3, C208A3, C208B3, C208C3, C209A3, C210A3, C211A3, C211B3, C212A3, C212B3, C212C3, C212D3, C212E3		
Média, Amb		Muito Baixas (1)	Baixas (2)	Moderadas (3)	Elevadas (4)	Muito Elevadas (5)
		CONSEQUÊNCIAS				

Figura nº 28 - Representação da matriz de risco com probabilidade média relativamente a perdas ambientais.

**Quadro 13 - Enquadramento de actividades ambientais conforme classe de risco.**

CLASSES DE RISCO	DESCRIÇÃO	ACTIVIDADES
<b>F</b>	<b>Intolerável</b>	Sem valores atribuídos
E	Muito Elevado	C203A3, C205B3
D	Elevado	C101A3, C101B3, C101C3, C201F3, C202B3, C202C3, C202D3, C202E3, C202F3, C202G3, C202H3, C206B3, C209B3
C	Moderado	C101D3, C201E3, C202A3, C203B3, C203I3, C204A3, C205A3, C205C3, C206A3, C206C3, C207A3, C208A3, C208B3, C208C3, C209A3, C210A3, C211A3, C211B3, C212A3, C212B3, C212C3, C212D3, C212E3
B	Baixo	Sem valores atribuídos
A	Muito baixo	Sem valores atribuídos

Para uma percepção mais global da apreciação de risco, consulte-se o anexo IV deste trabalho, uma vez que lá consta um quadro resumo do estudo elaborado nesta área.

## 4. Conclusão

### 4.1. Conclusões gerais

- O estudo da análise quantitativa em termos de vidas fornece resultados que se consideram válidos para análise, uma vez que os fenómenos com que se relacionam possuem um carácter de perigosidade semelhante aos identificados noutros tipos de estudos. Deste resultou que as actividades com maior percepção de risco são aquelas que estão relacionadas com encravamento de comportas ou funcionamento deficiente dos órgãos de descarga da barragem. Na outra extremidade, os fenómenos relacionados com a ruptura do açude de S. Marcos e o deslizamento de terras não têm grande impacto junto do corpo de barragem, sendo que se localizam na área de aceitabilidade deste tipo de estudo.
- A análise quantitativa relativa a economia equivalente obteve resultados em que a maioria dos critérios se localiza em regiões de intolerabilidade. Este facto pode dever-se a uma má calibração de resultados de estudo ressaltando-se que esta temática ainda padece de fundamentação visto que os estudos elaborados se revelaram inconclusivos, daí o cariz de inconsistência de resultados ser natural. Os resultados obtidos devem então ser desconsiderados servindo apenas o propósito de análise espacial das interacções de ordem económica relativas à barragem em estudo.
- A análise qualitativa produziu também resultados adequados ao estudo em causa. De salientar que as actividades que maior perigo possuem a nível de perdas de vida e perdas económicas são relacionadas com a falha dos órgãos de segurança. Relativamente às falhas ambientais, a maior incisão dá-se em fenómenos de falhas de órgãos de segurança (encravamento de uma comporta) e falha estrutural - erosão interna (zonas húmidas ou ressurgências no talude de jusante).
- A matriz de risco permite uma análise transversal a todos os tipos de perdas uma vez que a base utilizada para avaliação é a mesma contudo com factores bem calibrados que se podem comparar entre si. Observando as matrizes, pode concluir-se que devido à sua dispersão, os valores económicos serão aqueles que terão maior peso na ponderação final, uma vez que a concentração de actividades se dá em níveis de classes de risco com tendência para o elevado, enquanto a análise ambiental revela uma preponderância menos relevante devido à concentração de actividades em classes de risco menos graves.
- Tendo em conta os dois tipos de análise, verifica-se conforme expectável que a existência de um PEI, quando cumprido, diminui os factores de risco associados a cada actividade. Assim sendo, pode-se afirmar que a aplicação de um plano de

emergência estruturado com uma gestão de riscos é uma mais-valia substancial num projecto desta natureza. Ainda de acordo com os resultados obtidos, a diferença entre um projecto ter PEI e não o ter traduz-se em ganhos visto que a solução foi devidamente estudada e acompanhada, factores estes que conduziram a uma diminuição do risco existente.

- Os dois tipos de análises quando comparados, revelam uma complementaridade na ponderação das actividades em estudo interessante. Se por um lado a análise quantitativa empresta um carácter de rigor na escolha de dados das actividades, a análise qualitativa permite uma visualização directa do enquadramento de actividades de acordo com o seu grau de risco.
- A análise quantitativa permite uma simplificação na interpretação de resultados a serem desenvolvidos de acordo com a inserção destes nas três áreas de estudo: aceitável, ALARP e intolerável. Este tipo de análise possui um carácter mais técnico não sendo um bom instrumento de visualização do risco atribuído a grupos de estudo sem formação na área.
- A análise qualitativa permite uma visão directa das problemáticas em estudo contudo pode revelar-se vaga em algumas temáticas, nomeadamente quando as temáticas em estudo são semelhantes apenas variando em algumas características e acabam por ser enquadradas na mesma classe de risco. Este resultado pode ser enganador e não acrescentar qualidade à sua análise.
- Interpretando as duas análises, tendo em consideração a falha de órgãos de segurança, este é tido como o tipo de ocorrência mais gravosa em estudo, sendo que deve ser devidamente monitorizado e, se possível, dotá-lo de acções de prevenção extraordinárias. Esta diminuição de risco poderá passar por elaboração de um plano de manutenção de limpeza de barragens junto aos órgãos de segurança ou até pelo redimensionamento deste tipo de órgãos.
- Os fenómenos menos preocupantes são os relacionados com a destruição do açude de São Marcos e o deslizamento de encostas, resultados este obtidos e comprovados pelos dois tipos de análise efectuados. O risco associado a este tipo de actividades é baixo portanto não requerem um acompanhamento especial e não põe em risco a segurança da barragem.
- Os valores de probabilidades utilizados neste trabalho têm a sua génese em julgamentos de engenharia. Devido ao explanado neste trabalho, estes valores requerem de confirmação por forma a serem validados.

## **4.2. Propostas para futuros trabalhos**

Seguem-se algumas propostas que podem constituir matéria para elaboração de novas dissertações relacionadas com a temática estudada.

- Exploração do conceito de análise de risco e controlo de risco perfazendo um trabalho completo de gestão de risco.
- Compilação de informação relativa a probabilidades de ocorrência de vários factores relacionados com barragens, com maior incidência para barragens de aterro.
- Apreciação de risco para uma barragem de betão
- Exploração de outras metodologias de análise de apreciação de risco da mesma barragem.



## Bibliografia

ANCOLD. *Glossary of Definitions, Terms and Abbreviations*. Acedido em 14 de Setembro de 2011 em: <http://www.ancold.org.au/images/files/glossary.pdf>

ALMEIDA, A., (2006). *Avaliação de Riscos, Segurança e Fiabilidade - Introdução à Gestão dos Riscos*. Instituto Superior Técnico, Lisboa.

BAPTISTA, M. (2009). *Abordagens de risco em barragens de aterro*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa.

DECRETO LEI n.º 344/2007 de 15 de Outubro — N.º 198, 1.ª série. Ministério da Agricultura, do Desenvolvimento Rural e das Pescas.

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL (Brasil). *Barragens*. Acedido em 23 de Junho de 2011 em: [http://www.lapes.ufrgs.br/discpl\\_grad/geologia3/barragens.pdf](http://www.lapes.ufrgs.br/discpl_grad/geologia3/barragens.pdf)

DSC (New South Wales Dams Safety Committee) (2007). *Risk Management Policy Framework For Dam Safety*. New South Wales Government, País de Gales, Reino Unido.

FRANCA, M.J. *et al*, (2010). *Plano de acção do plano de emergência interno da barragem de Odelouca, 10º Congresso da Água*. Alvor. Março.

FRANCA, M.J. *et al*, (2011) . *Internal emergency action plans for dams – application to the Odelouca earthen dam, 6th International Conference on Dam Engineering*. Lisboa. Fevereiro. Eds: Pina C., Portela E. e Gomes J.P., pp. 465-484, CI-Premier Pte Ltd, ISBN: 9789810878962.

GARCIA, C. (2011). *Parametrização e validação do modelo computacional de brechas em barragens de aterro RoDaB*. Tese de mestrado de Universidade Nova de Lisboa - Faculdade de Ciências de Tecnologia, Monte da Caparica.

GOMES, R. *O caso de Foz Côa: percurso de um símbolo na definição de políticas culturais em Portugal*. Agora. Acedido em 20 de Novembro de 2011 em: [http://www.oac.pt/pdfs/agora13\\_port.pdf](http://www.oac.pt/pdfs/agora13_port.pdf)

GRAHAM, W. (1999). *A procedure to estimate loss of life caused by dam failure*. U.S. Department of Interior, Bureau of Reclamation. Denver, Estados Unidos da América.

HILL, P. *et al*. (2003). *Estimating overall risk of dam failure: Practical considerations in combining failure probabilities*. Acedido em 17 de Outubro de 2010 em: <http://uwrl.usu.edu/www/faculty/DSB/ancold03estimating.pdf>

HILL, P. *et al.* (2011). *On the art of event tree modeling for portfolio risk analyses*. Acedido em 17 de Outubro de 2011 em: <http://uwrl.usu.edu/people/faculty/DSB/ancold2001eta2final.pdf>

ICOLD (1995). *Ruptures de barrages – Analyse statistique – Bulletin 99*. Accidents en cours de construction **4**: 38-45. Paris, França.

ICOLD (2001). *Tailings Dams – Risk of dangerous occurrences – Lessons learnt from practical experiences – bulletin 121*. Paris, França.

ICOLD (2011). *Why do we need dams*. Acedido em 13 de Setembro de 2011 em: [http://www.icold-cigb.net/GB/Dams/role\\_of\\_dams.asp](http://www.icold-cigb.net/GB/Dams/role_of_dams.asp)

INSTITUTO DA ÁGUA - INAG (2001). *Curso de exploração e segurança de barragens*. Instituto da Água (INAG). Lisboa.

LANÇA, R. (1997). *Tipologias, condicionamento e acções em barragens de aterro*. Universidade do Algarve, Algarve.

PORTARIA n.º 246/98 de 21 de Abril - *Diário da República 93/98 - Série I*. Ministérios da Defesa Nacional, da Administração Interna, do Equipamento, do Planeamento e da Administração do Território, da Economia, da Agricultura, do Desenvolvimento Rural e das Pescas e do Ambiente.

PORTARIA n.º 846/93 de 10 de Setembro – *Diário da República 213/93 - Série I-B*. Ministérios da Defesa Nacional, da Administração Interna, do Equipamento, do Planeamento e da Administração do Território, da Economia, da Agricultura, do Desenvolvimento Rural e das Pescas e do Ambiente.

Caldeira, L. *in* INAG. (2001). *Curso de exploração e segurança de barragens*. Instituto da Água (INAG). Lisboa.

ROLF, S.; EKNES, M., (1997). *Economic activity and societal risk acceptance*. Det Norske Veritas, Strategic Research. Høvik, Noruega.



# **Anexos**



**Anexo I**

**Quadro global de análise quantitativa**



## **Anexo II**

### **Quadro particular de análise quantitativa**



Quadro 14 - Dados relativos a factores económicos

Designação	Unidades	Quantidade	Valor da perda un.	Valor perda total
<b>Perdas económicas</b>				
<b>Habitação</b>				
Habitação Permanente	m2	41	100.000,00 €	4.100.000,00 €
Habitação temporária	m2	17	100.000,00 €	1.700.000,00 €
Desconhecido	m2	20	100.000,00 €	2.000.000,00 €
Desocupado	m2	12	80.000,00 €	960.000,00 €
Ruína	m2	8	50.000,00 €	400.000,00 €
<b>Industria</b>				
Sem dados disponíveis				
<b>Serviços / Lazer</b>				
Sem dados disponíveis				
<b>Obras de arte</b>				
Barragem total	v.g.	0	125.700.000,00 €	0,00 €
Barragem corpo	v.g.	1	81.500.000,00 €	81.500.000,00 €
Ponte limite ZAS	v.g.	1	2.000.000,00 €	2.000.000,00 €
Pontes S01 e S02	v.g.	2	800.000,00 €	1.600.000,00 €
<b>Redes</b>				
rodoviária	m	4700	100,00 €	470.000,00 €
<b>Outros</b>				
				0,00 €
<b>Perdas em termos de vítimas</b>				
Humanas	v.u.	0		0,00 €
	v.u.	71	200.000,00 €	14.200.000,00 €
	v.u.	142	200.000,00 €	28.400.000,00 €
<b>Perdas Ambientais</b>				
Zona de cultivo	h	443	100,00 €	44.300,00 €
Zona Florestal	h	143	60,00 €	8.580,00 €
<b>Perdas Patrimoniais</b>				
Sem dados disponíveis				





**Anexo III**

**Gráficos bi-logarítmicos para análise  
quantitativa**



## Perdas de vidas

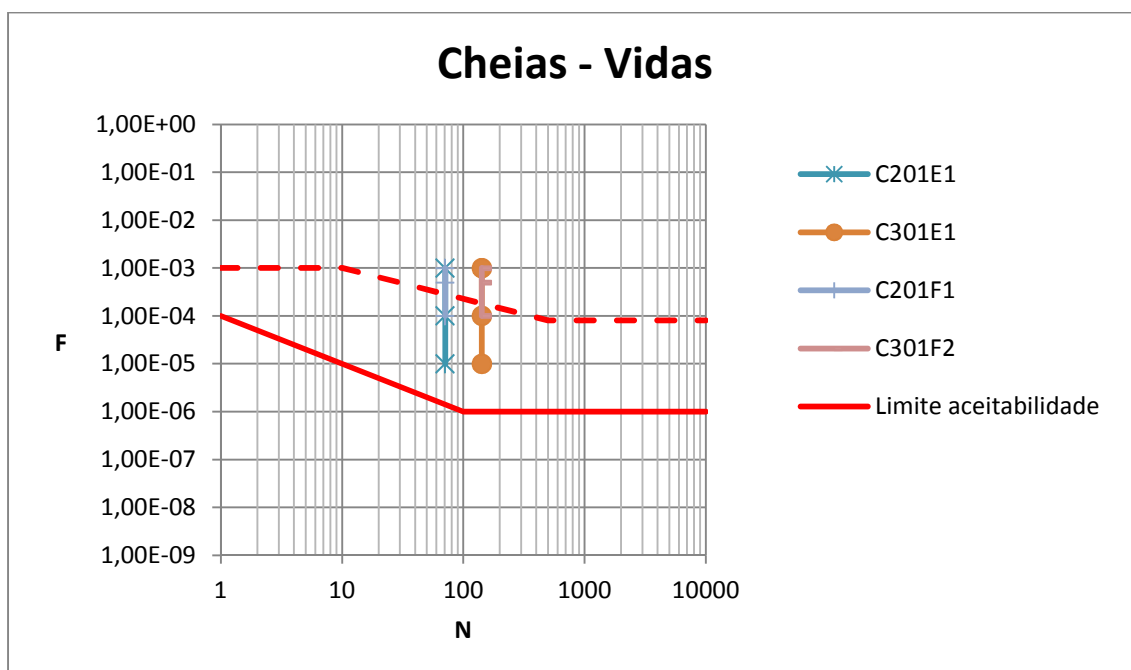


Figura nº 29 - Gráfico bi-logarítmico de relação entre a actividade Cheias e o número de perdas de vida.

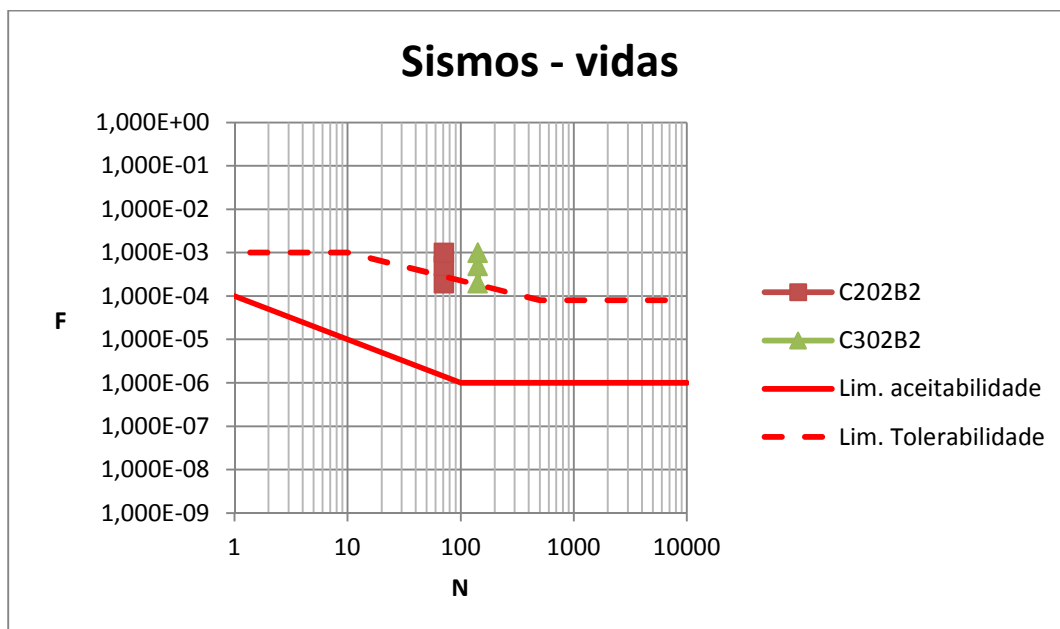


Figura nº 30 - Gráfico bi-logarítmico de relação entre a actividade Sismos e o número de perdas de vida.

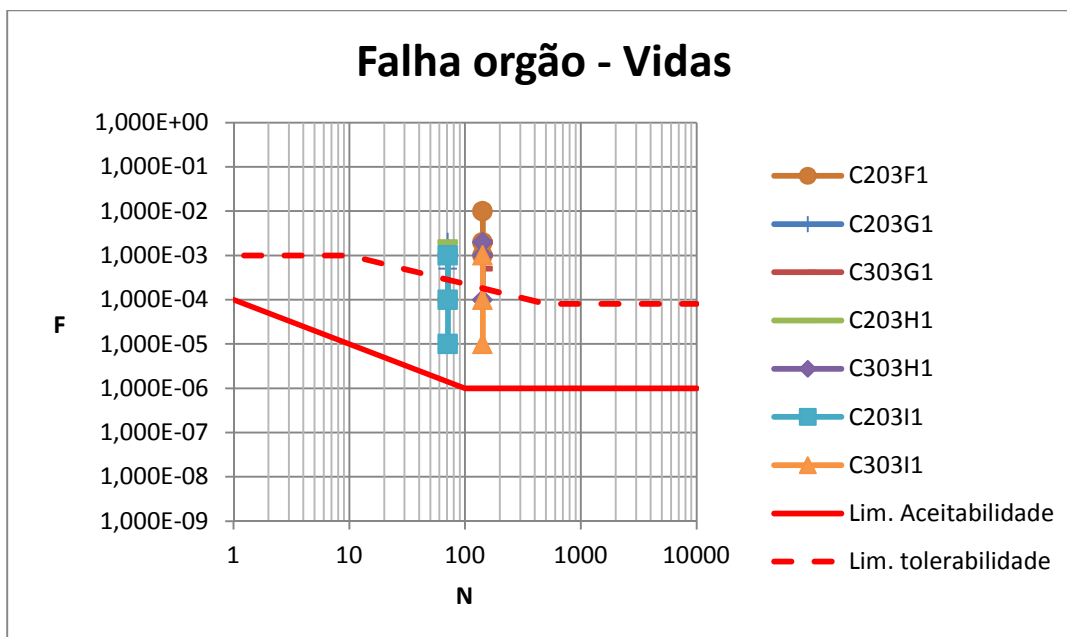


Figura nº 31 - Gráfico bi-logaritmico de relação entre a actividade Falhas de órgãos de descarga e o número de perdas de vida.

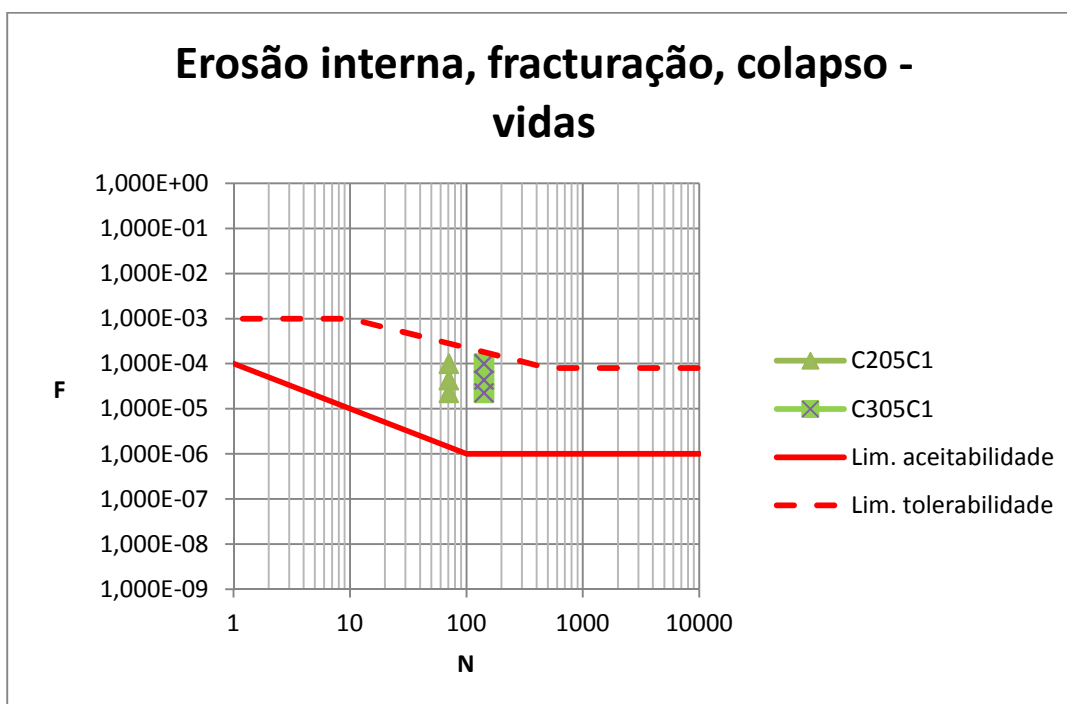


Figura nº 32 - Gráfico bi-logaritmico de relação entre o tipo Falha estrutural com as actividades de Erosão interna, Transferência de tensões /Fracturação hidráulica, Colapso, subsidência ou fissuração localizada e o número de perdas de vida.

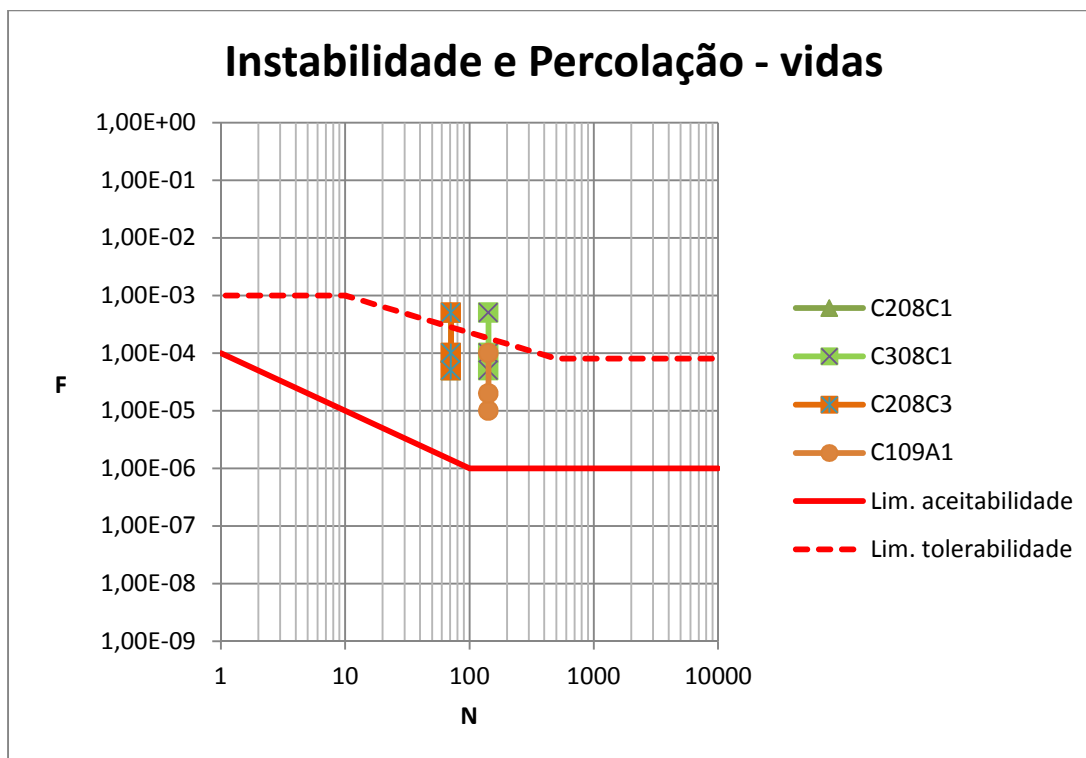


Figura nº 33 - Gráfico bi-logaritmico de relação entre o tipo Falha estrutural com as actividades de Percolação através dos encontros e Instabilidade do corpo de barragem e o número de perdas de vida.

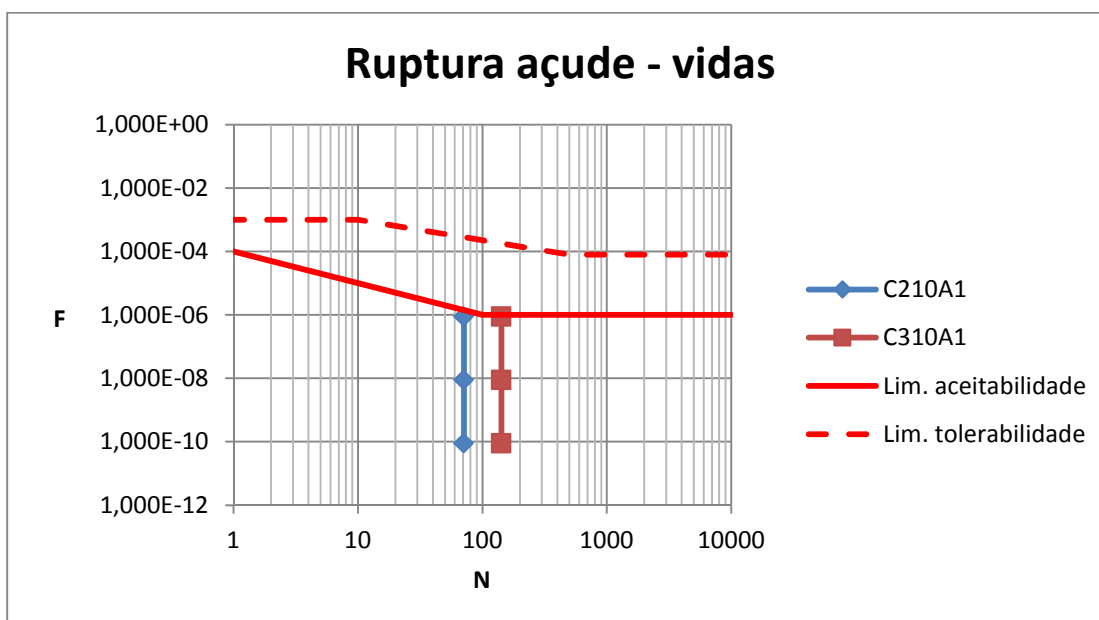


Figura nº 34 - Gráfico bi-logaritmico de relação Ruptura de açude de S. Marcos e o número de perdas de vida.

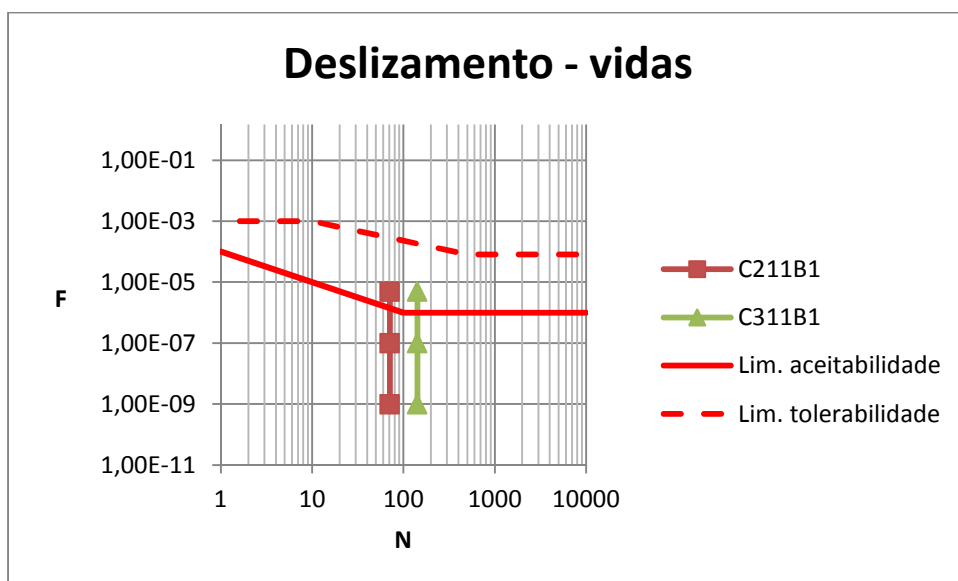


Figura nº 35 - Gráfico bi-logaritmico de relação Deslizamento de encostas e o número de perdas de vida.

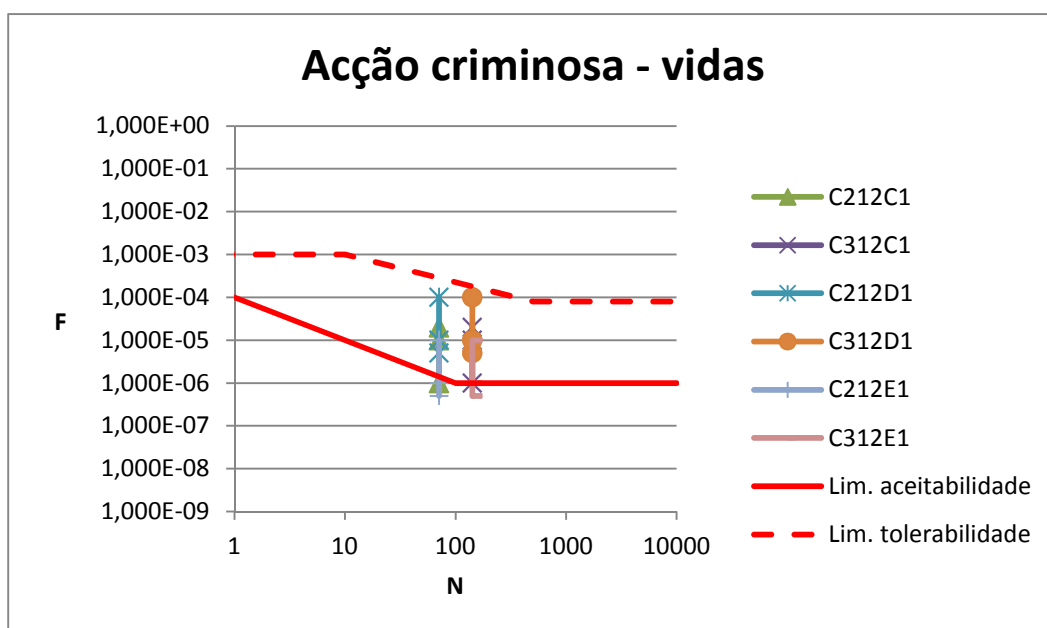


Figura nº 36 - Gráfico bi-logaritmico de relação Acção criminosa e o número de perdas de vida.

Perdas económicas equivalentes

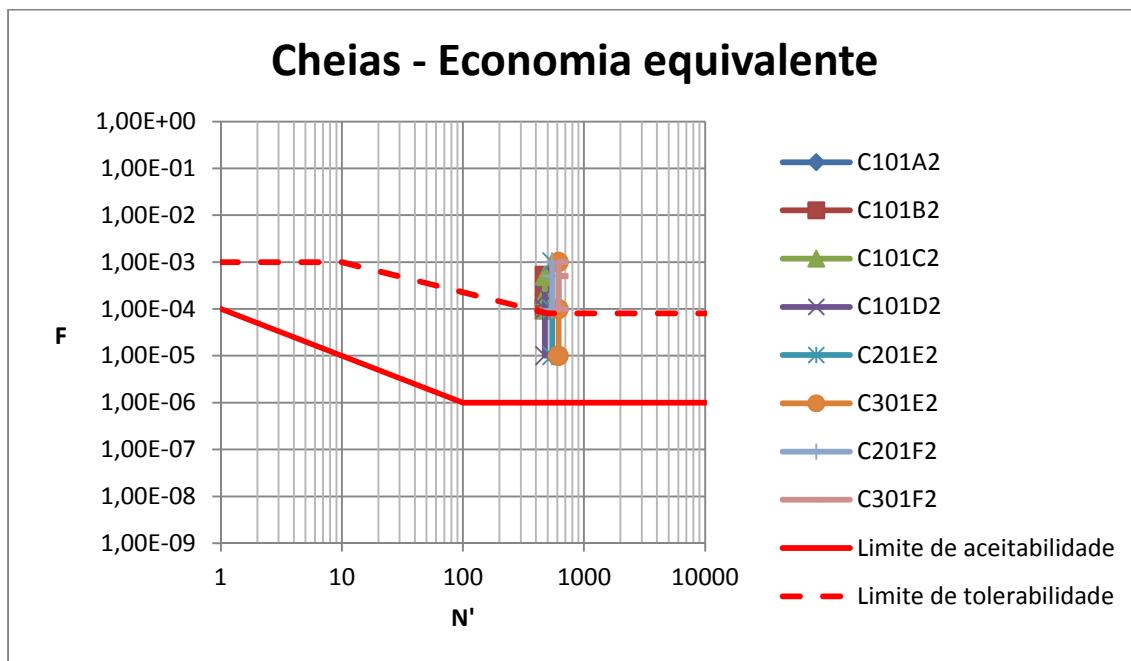


Figura nº 37 - Gráfico bi-logaritmico de relação Cheias e o número de perdas de economia equivalente.

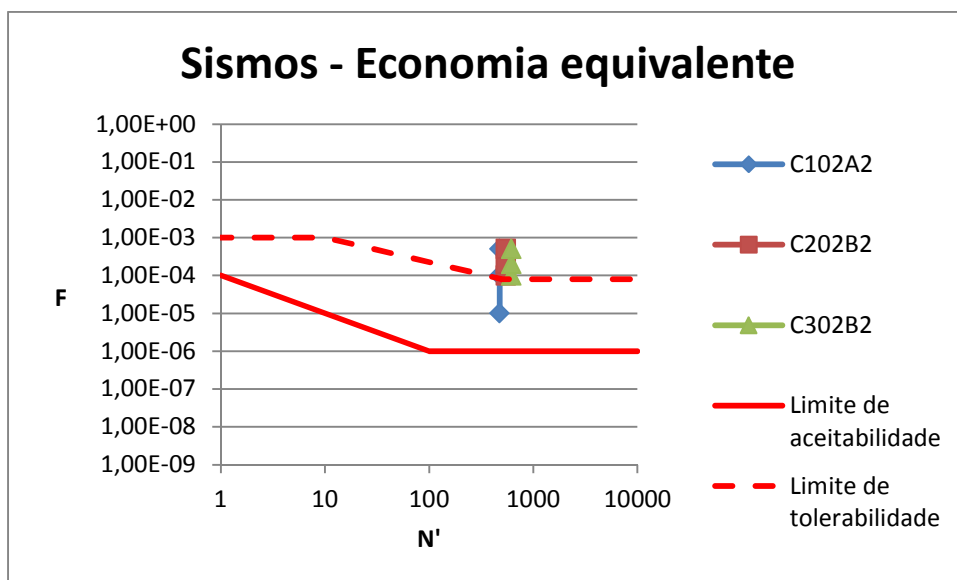


Figura nº 38 - Gráfico bi-logaritmico de relação Sismos e o número de perdas de economia equivalente.

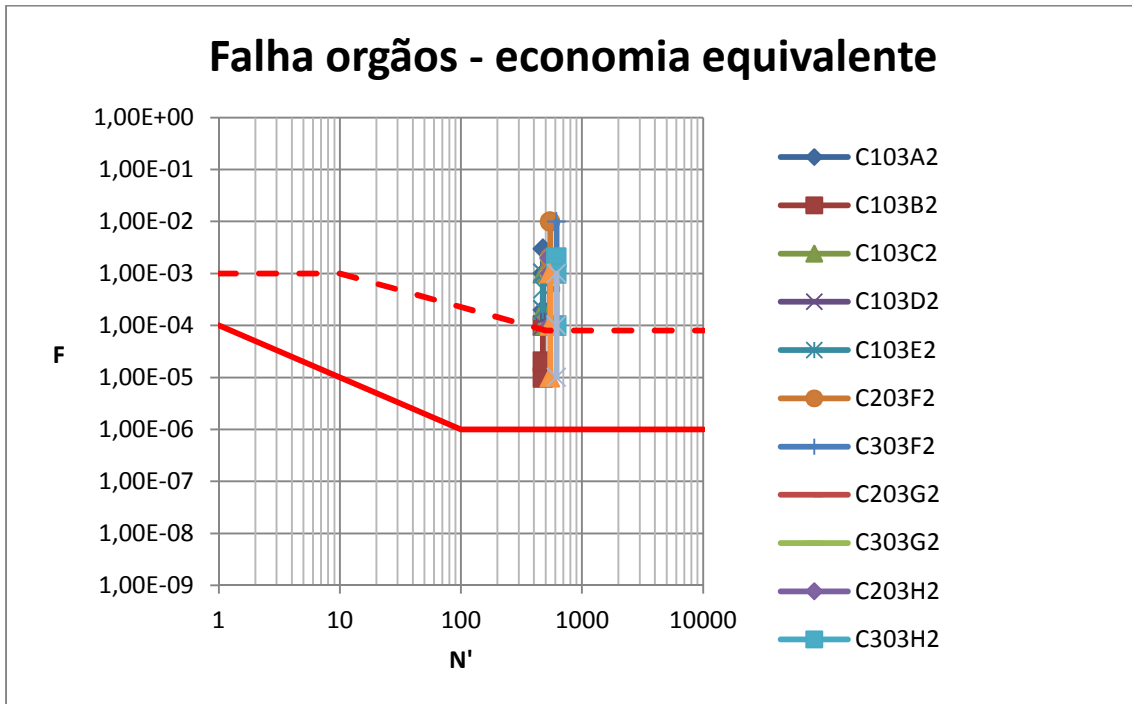


Figura nº 39 - Gráfico bi-logarítmico de relação Falha nos órgãos de segurança e o número de perdas de economia equivalente.

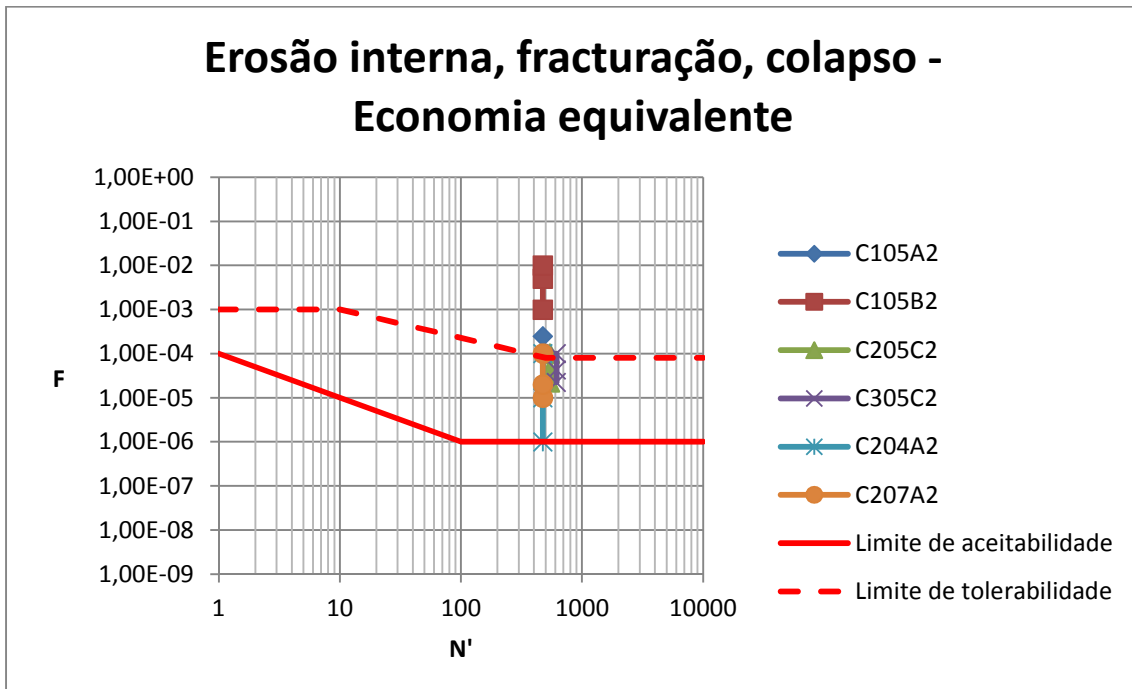


Figura nº 40 - Gráfico bi-logarítmico de relação entre o tipo Falha estrutural com as actividades de Erosão interna, Transferência de tensões /Fracturação hidráulica, Colapso, subsidência ou fissuração localizada e o número de perdas de economia equivalente.



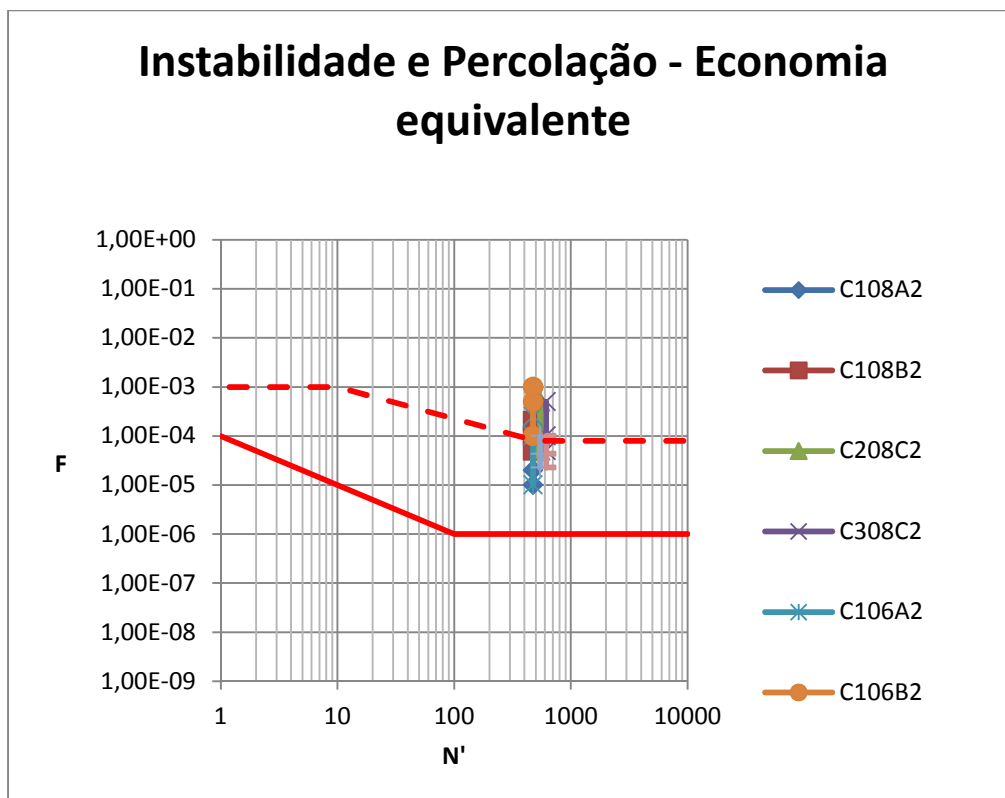


Figura nº 41 - Gráfico bi-logaritmico de relação entre o tipo Falha estrutural com as actividades de Percolação através dos encontros e Instabilidade do corpo de barragem e o número de perdas de economia equivalente.

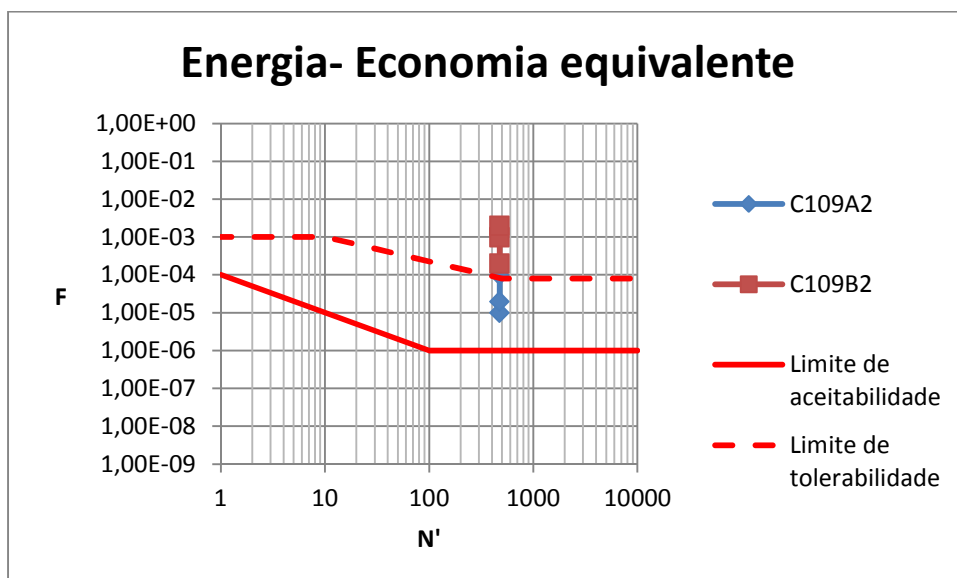


Figura nº 42 - Gráfico bi-logaritmico de relação Falha de energia e o número de perdas de economia equivalente.

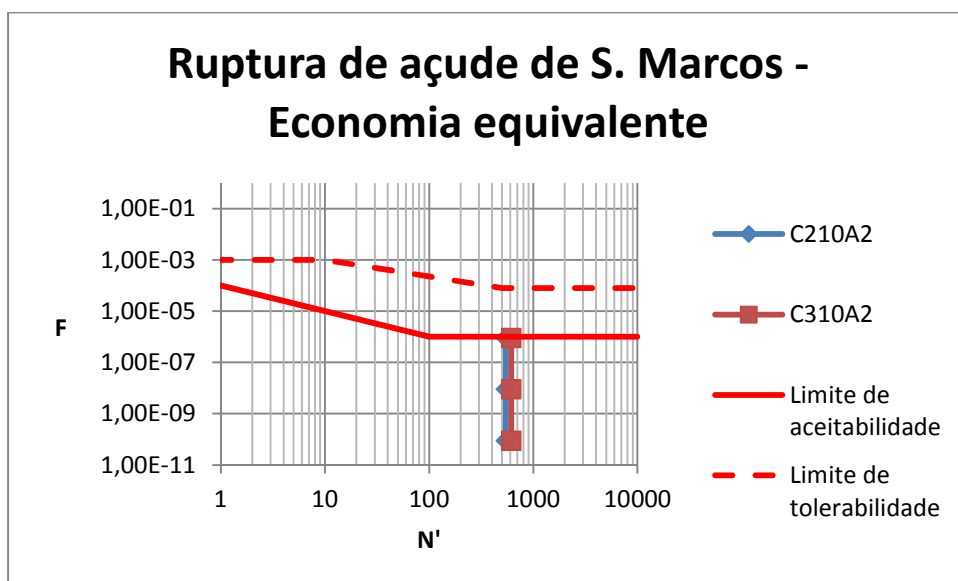


Figura nº 43 - Gráfico bi-logaritmico de relação Ruptura de açude de S. Marcos e o número de perdas de economia equivalente.

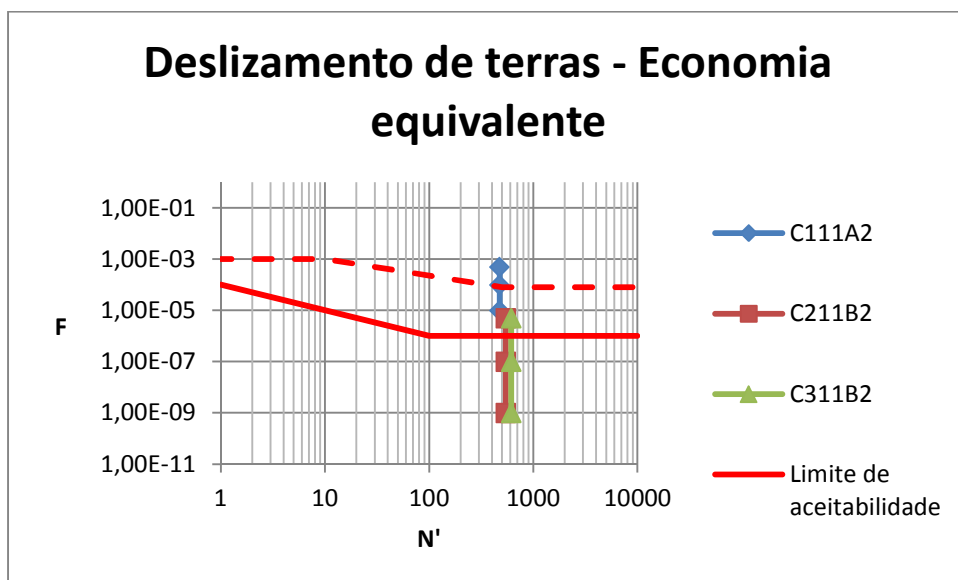


Figura nº 44 - Gráfico bi-logaritmico de relação Deslizamento de terras e o número de perdas de economia equivalente.

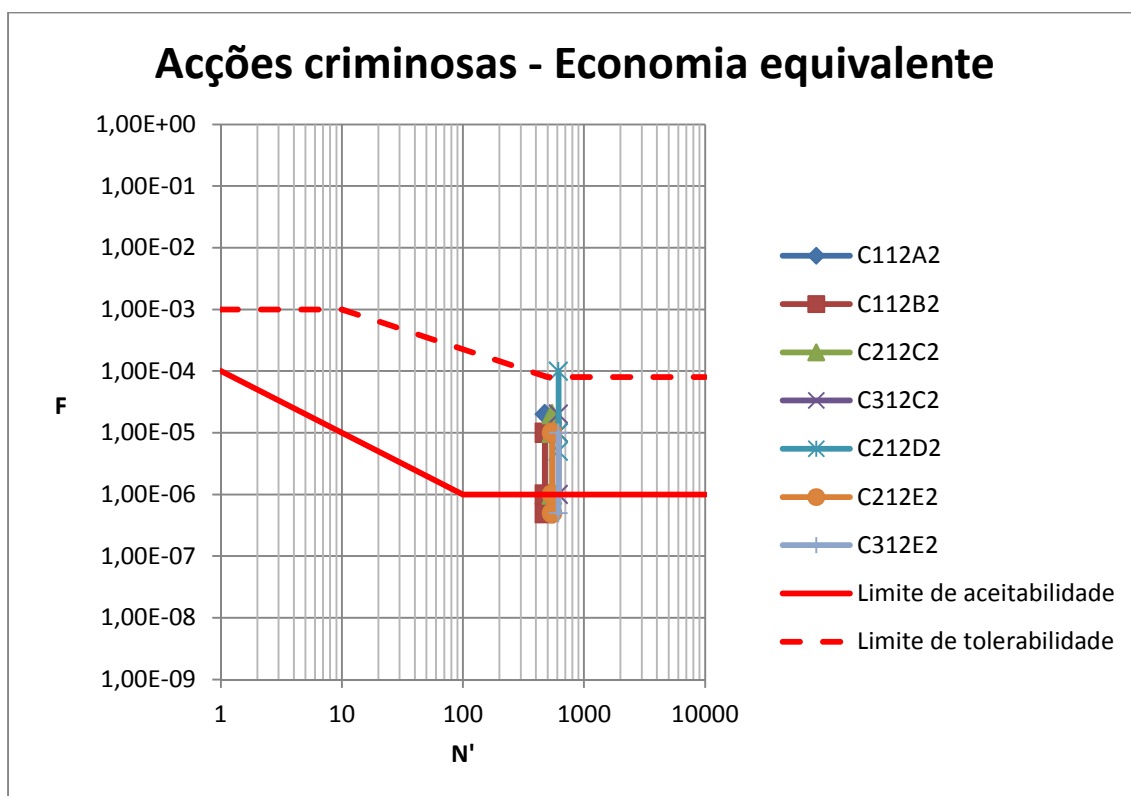


Figura nº 45 - Gráfico bi-logaritmico de relação Acções criminosas e o número de perdas de economia equivalente.



**Anexo IV**

**Quadro relativo à análise qualitativa**